

Beitrag zur Ermüdungsfestigkeit von ADI-Gussbauteilen

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Torben Engelke

aus Hildesheim

genehmigt von der Fakultät für
Mathematik / Informatik und Maschinenbau
der Technischen Universität Clausthal,

Tag der mündlichen Prüfung: 08.02.2019

Dekan und Vorsitzender der
Promotionskommission:
Betreuer:
Gutachter:

Professor Dr.-Ing. Volker Wesling
Professor Dr.-Ing. Alfons Esderts
Professor Dr.-Ing. Babette Tonn

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit am Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit der Technischen Universität Clausthal. Sie baut auf dem von mir bearbeiteten FVA Forschungsvorhaben „Betriebsfestigkeitsnachweis von ADI-Gussbauteilen“ auf. Dies wurde über die AiF gefördert. Für die Unterstützung und die gute Zusammenarbeit in Arbeitskreis Berechnung und Simulation der FVA möchte ich mich bedanken.

Besonders möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Esderts für die Betreuung meiner Arbeit bedanken. Er hat mir bei meiner Arbeit am Institut viele Freiheiten eingeräumt und gleichzeitig durch Anregungen und fachliche Diskussionen zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen.

Weiterhin möchte ich mich auch bei Frau Prof. Dr.-Ing. B. Tonn für die Übernahme der Rolle der Gutachterin sowie für die interessanten Diskussionen aus werkstofftechnischer Sicht bedanken.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei meinen ehemaligen Kollegen am Institut. Den Kollegen im wissenschaftlichen Bereich möchte ich unter anderem für die vielen fachlichen Diskussionen danken. Ein großer Dank gilt auch den Mitarbeitern in der mechanischen Werkstatt und dem Elektroniklabor für die Fertigung der Proben und die Unterstützung beim Aufbau der Prüfstände. Des Weiteren gilt mein Dank dem Sekretariat für die Hilfe bei vielen organisatorischen Fragen. Nicht zuletzt sind da noch viele Hilfskräfte denen ich für die Unterstützung bei den unterschiedlichsten Aufgaben danken möchte.

Meinen Eltern gilt ein ganz besonderer Dank. Sie haben mich auf meinem Weg stets unterstützt und schon früh meine Interessen erkannt und gefördert.

Nicht zuletzt möchte ich mich auch bei meiner Freundin Mailin bedanken. Sie hat viel Verständnis für mich und meine Arbeit aufgebracht und mich in meinen Zielen stets unterstützt.

Kurzfassung

Austempered Ductile Iron (ADI) ist ein wärmebehandeltes Gusseisen mit Kugelgraphit. Durch die Wärmebehandlung werden die Festigkeits- und Dehnungseigenschaften verbessert. Damit wird der Werkstoff interessant für den Einsatz in Bauteilen zur Substitution von Stahlguss- und Schmiedebauteilen. Um einen ADI bzw. ADI-Gussbauteile in der Praxis einzusetzen, muss für diese jedoch, wie für alle anderen Bauteile auch, ein Festigkeitsnachweis erbracht werden. Dieser kann prinzipiell sowohl experimentell als auch rechnerisch erbracht werden. Der rechnerische Festigkeitsnachweis bietet den Vorteil, dass kein ausgeführtes Bauteil benötigt wird und er somit bereits früh in der Produktentwicklungsphase durchgeführt werden kann. Somit ergeben sich bedeutende wirtschaftliche Vorteile durch einen rechnerischen Festigkeitsnachweis. Die Berechnungsrichtlinie des Forschungskuratoriums Maschinenbau e.V. (FKM-Richtlinie) bietet die Möglichkeit, einen rechnerischen Festigkeitsnachweis zu führen. Ihre Anwendbarkeit auf den Werkstoff ADI ist jedoch nicht untersucht.

In der vorliegenden Arbeit werden auf der Grundlage einer Datenbasis aus eigenen experimentellen Untersuchungen und Daten aus der Literatur Einflussgrößen auf die Schwingfestigkeit von ADI untersucht. Der Werkstoff weist dabei ein hohes Potential auf. Es zeigt sich aber auch, dass Abweichungen in der Werkstoffqualität, z.B. durch fehlerhafte Wärmebehandlungen, die Schwingfestigkeit deutlich reduzieren können.

Die Anwendbarkeit der FKM-Richtlinie auf die in der Datenbasis vorhandenen Versuchsergebnisse wird untersucht. Dabei zeigt sich eine eingeschränkte Anwendbarkeit der Richtlinie. Insbesondere der in der Richtlinie angenommene proportionale Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Werkstoff-Wechselspannungsfestigkeit kann nicht bestätigt werden. Er führt zur Überschätzung der Schwingfestigkeit hochfester ADI-Werkstoffe. Außerdem zeigt sich eine geringere Schubempfindlichkeit als in der Richtlinie angenommen. Durch eine vorgenommene Anpassung der Berechnung auf Basis der Versuchsdaten kann die Treffsicherheit erhöht werden, sodass unter anderem auch hochfeste Werkstoffe bewertet werden können. Aufbauend auf den Ergebnissen wird eine Anpassung der FKM-Richtlinie vorgeschlagen.

Abstract

Austempered Ductile Iron is a heat treated ductile iron which strength and toughness are improved. This makes the material interesting for the use in components which are normally produced as cast steel or forged components. For the technical use of ADI components a strength assessment, like it is needed for every component, has to be done. This can be done analytical or experimental. The advantage of the analytical strength assessment is, that no real component is needed. Thereby it can be done early in the process of the development which is an economic advantage. The FKM guideline is an often used possibility for an analytical strength assessment, but there is no investigation of the validity for ADI available, yet.

In the present work, the fatigue strength of ADI is investigated. Therefore, comprehensive fatigue tests are performed and data from literature is investigated. The material ADI shows a high resistance against fatigue damage. But the investigations also show that the heat treatment is complex and variations can lead to a lower fatigue strength.

Based on the experimental investigations and the data from the literature a comparison with the fatigue strength assessment according to the FKM guideline is done. The applicability of the guideline is given with restrictions. Especially the proportionality between tensile strength and fatigue strength is not confirmed. It leads to an overestimation of the fatigue strength of high strength ADI. In addition, the sensibility against shear stresses, which is estimated from the experimental tests, is minor then given in the guideline. The accuracy of the guideline can be improved by an adjustment of the calculation parameters. Thereby, high strength ADI materials as well as shear stresses can be rated better. Based on the results, an adaptation of the FKM guideline is proposed.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung.....	1
2	Zusammenfassung / Ergebnis	3
3	Stand der Technik.....	7
3.1	Schwingfestigkeit	7
3.1.1	Bestimmung der Zeitfestigkeitsgeraden	9
3.1.2	Bestimmung der Langzeitfestigkeit	10
3.1.3	Dehnungsregelte Versuche	11
3.1.4	Rissinitiierung unter schwingender Last	12
3.2	Der Werkstoff ADI.....	14
3.3	Schwingfestigkeit von ADI	16
3.4	Die FKM-Richtlinie.....	20
4	Experimentelle Untersuchungen.....	23
4.1	Versuchsprogramm.....	23
4.2	Werkstoffcharakterisierung	25
4.2.1	Zugversuche	25
4.2.2	Schlagbiegeversuche	27
4.2.3	Gefüge-Untersuchung	28
4.3	Versuchsaufbau und Durchführung.....	33
4.3.1	Genutzte Versuchsproben	33
4.3.2	Versuchsaufbau	36
4.4	Ergebnisse Schwingversuche	40
4.4.1	Spannungsgeregelte Versuche.....	40
4.4.2	Dehnungsgeregelte Versuche	40
4.4.3	Mehrachsigkeit	44
4.4.4	Bruchlage	45
4.5	Diskussion und Abgleich der Ergebnisse der Schwingversuche	46
4.5.1	Wöhlerlinienneigung im Zeitfestigkeitsbereich	46

4.5.2	Wöhlerlinienneigung im Langzeitfestigkeitsbereich.....	49
4.5.3	Gegenüberstellung der ermittelten Wöhlerlinien	58
4.5.4	Betrachtung der Rissausgangspunkte	60
5	Rechnerische Auslegung von ADI-Gussbauteilen	66
5.1	Einflussgrößen auf die Schwingfestigkeit	66
5.1.1	Abhängigkeit von Werkstoff-Wechselfestigkeit und Zugfestigkeit.....	66
5.1.2	Einfluss der Geometrie.....	68
5.1.3	Mittelspannungsempfindlichkeit	77
5.1.4	Schubwechselfestigkeit	79
5.2	Anpassung der Berechnung der Bauteilfestigkeit.....	81
5.2.1	Berücksichtigung des elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens	81
5.2.2	Optimierung der Berechnungsparameter.....	82
5.2.3	Ansatz zur Bestimmung der Werkstoff-Wechselfestigkeit	88
5.3	Vergleich der Ansätze zur Abschätzung der Langzeitfestigkeit	91
5.4	Gekerbte Proben	100
5.5	Rechnerische Abschätzung von Wöhlerlinien.....	103
5.6	Sicherheitskonzept.....	114
5.7	Berechnung auf Basis der Stützzahlen nach Stieler.....	118
6	Vorschlag für die Anpassung der FKM-Richtlinie	122
7	Literaturverzeichnis.....	126
8	Symbol- und Abkürzungsverzeichnis.....	134
9	Anhang.....	137
9.1	Berechnung des hochbeanspruchten Volumens	137
9.1.1	Flachbiegung.....	137
9.1.2	Torsion	138
9.1.3	Umlaufbiegung.....	139
9.1.4	Andere Probenformen	140
9.2	Abschätzung der zyklischen Kennwerte.....	140

9.3	Datenbasis	143
9.4	Übersicht Einzelversuchsergebnisse.....	149
9.5	Werkstoffprüfzeugnisse.....	173

1 Einleitung und Zielsetzung

Austempered Ductile Iron (ADI) ist ein Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS), dessen quasistatischen Festigkeits- und Dehnbarkeitseigenschaften gegenüber einem klassischen Gusseisen mit Kugelgraphit durch eine Wärmebehandlung gesteigert sind. Unterschiedliche Untersuchungen bescheinigen dem Werkstoff auch eine gesteigerte Schwingfestigkeit [LEA 11], [Wohl 11]. Damit bietet ADI ein großes Potential für den Einsatz in technischen Anwendungen. So können z.B. Stahlguss- oder auch Schmiedebauteile durch ADI-Gussbauteile substituiert werden. ADI bietet hier neben der einfacheren Fertigung das Potential zur Gewichtsreduktion, da, aufgrund des hohen Kohlenstoffgehalts, die Dichte von ADI ca. 10 % unterhalb der von Stahl liegt. Mögliche Anwendungsbereiche reichen von Achs- und Motorenbauteilen bis hin zu Befestigungselementen, [Röhr 03].

Um einen sicheren Betrieb von technischen Anlagen und Maschinen zu gewährleisten, muss ein Festigkeitsnachweis erbracht werden. Dieser kann sowohl experimentell als auch rechnerisch durchgeführt werden. Der rechnerische Festigkeitsnachweis bietet dabei unter anderem den Vorteil, dass für ihn kein ausgeführtes Bauteil benötigt wird und er somit bereits früh in der Entwicklungsphase erbracht werden kann. Damit ist er für eine wirtschaftliche Durchführung von Entwicklungs- und Konstruktionsarbeiten unabdingbar.

Derzeit liegt kein technisches Regelwerk für den Betriebsfestigkeitsnachweis von ADI-Gussbauteilen vor. Richtlinien wie die FKM-Richtlinie [FKM 12] beinhalten zwar prinzipiell, im Rahmen der Eisengusswerkstoffe mit Kugelgraphit (GJS), auch den Werkstoff ADI, eine explizite Untersuchung der Anwendbarkeit fehlt jedoch. Anderweitige Untersuchungen der Schwingfestigkeit von ADI liegen in Teilbereichen vor, wurden jedoch zumeist nicht explizit mit technischen Regelwerken abgeglichen.

In der vorliegenden Arbeit soll, der mit [FKM 12] vorliegende Ansatz, für einen rechnerischen Festigkeitsnachweis von ADI-Gussbauteilen, überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Ziel ist es, die Bauteilfestigkeit bei schwingender Belastung rechnerisch möglichst unabhängig von der Belastungsart und möglichst treffsicher vorhersagen zu können. Die Möglichkeit eines rechnerischen Festigkeitsnachweises versetzt den Anwender in die Lage, das Potential von ADI besser auszunutzen und die Risiken des Ermüdungsversagens zu minimieren. Damit kann die Hürde für einen Umstieg auf den Werkstoff ADI für den praktischen Einsatz reduziert werden.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich wie folgt:

Zunächst wird der aktuelle Stand der Technik dargestellt. Hier werden sowohl die Grundlagen der Schwingfestigkeit als auch der Werkstoff ADI behandelt. Des Weiteren wird der Ermüdungsfestigkeitsnachweis nach der FKM-Richtlinie vorgestellt.

Das folgende Kapitel befasst sich mit den durchgeführten experimentellen Untersuchungen mit denen die Datenbasis zur Schwingfestigkeit von ADI-Guss ergänzt wird. Ein Schwerpunkt wird dabei auf die Untersuchung der Mittelspannungsempfindlichkeit gelegt, da sich in der Literatur zum Großteil nur Untersuchungen bei wechselnder Belastung finden. Außerdem werden Torsionsversuche durchgeführt, um auch die Schubempfindlichkeit besser experimentell abzudecken.

Den Hauptteil der Arbeit stellt der Abgleich der FKM-Richtlinie mit den experimentellen Ergebnissen dar. Dazu werden zunächst die einzelnen Einflussgrößen auf die Schwingfestigkeit betrachtet. Im Anschluss erfolgt eine Optimierung der Berechnung auf der Grundlage der Datenbasis. Dabei werden zwei unterschiedliche Ansätze gewählt. Im ersten Schritt erfolgt die Berechnung zwar in Anlehnung an die FKM-Richtlinie, die Anpassung erfolgt jedoch frei von Einschränkungen bzgl. einer möglichen späteren Integration in die Richtlinie. Im zweiten Schritt wird die Integration in die FKM-Richtlinie in den Vordergrund gerückt. Hier sollen die Algorithmen und Kennwerte aus der FKM-Richtlinie weitestgehend auch für ADI-Werkstoffe übernommen werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen werden schließlich Vorschläge zur Anpassung der FKM-Richtlinie vorgestellt und Empfehlungen für die Berechnung gegeben. Diese sollen die Auslegung von ADI-Gussbauteilen auf Basis der FKM-Richtlinie ermöglichen und die Treffsicherheit der Berechnung erhöhen.

Die vorliegende Arbeit basiert auf dem durch die das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten IGF-Vorhaben 18567 N/1. Das Forschungsvorhaben wurde in der Forschungsvereinigung Antriebstechnik unter der Nummer 743I durchgeführt. Der Abschlussbericht liegt mit [Enge 18a] vor.

Teile der in dieser Arbeit enthaltenen Untersuchungen und Ergebnisse wurden bereits im Vorfeld veröffentlicht: [Enge 17], [Enge 18a], [Enge 18b] und [Enge 18c]. Da die Veröffentlichungen im Rahmen der Dissertation entstanden sind, wird teilweise auf eine eindeutige Kennzeichnung der verwendeten Inhalte verzichtet.

2 Zusammenfassung / Ergebnis

Die Basis der vorliegenden Arbeit bilden experimentelle Untersuchungen der Schwingfestigkeit von ADI-Werkstoffen. Dazu werden Versuchsergebnisse aus der Literatur und am Institut durchgeführten Versuchen zu einer Datenbasis zusammengeführt. Für die Untersuchungen am Institut werden die Werkstoffe GJS 800-8 und GJS 1400-1 gewählt. Damit wird die Werkstoffgruppe ADI von Werkstoffen mit hoher Dehnbarkeit, aber geringerer Festigkeit bis zu hochfesten Werkstoffen abgedeckt. Das Versuchsprogramm ist dahingehend festgelegt, dass es die aus der Literatur bekannten Daten bestmöglich ergänzt. Neben Flachbiegeversuchen bei unterschiedlichen Mittelspannungen, zur Bestimmung der Mittelspannungsempfindlichkeit, werden umfangreiche Versuche unter Torsionsbelastung durchgeführt, um die Schwingfestigkeit bei Schubspannungen zu untersuchen.

Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass die Schwingfestigkeit des GJS 1400-1 geringer ist als die Schwingfestigkeit des GJS 800-8. Damit steigt die Schwingfestigkeit nicht mit zunehmender Zugfestigkeit an, wie es bei anderen Werkstoffgruppen üblicherweise beobachtet werden kann. Diese Beobachtung deckt sich mit Ergebnissen aus der Literatur [Lin 98], [Kahl 05] und ist auch in der DIN 1564 [DIN 1564] enthalten. Für den Langzeitfestigkeitsbereich zeigt sich, dass im Bereich bis 10^7 Lastwechseln keine ausgeprägte Dauerfestigkeit erkennbar ist. So treten bis kurz vor der Grenzlastschwingspielzahl von 10^7 Lastwechseln Brüche auf und in exemplarischen, längeren Versuchen auch danach. Aus diesem Grund wird auf Basis einer Berechnung nach der „Maximum-Likelihood“-Methode die Neigung der Wöhlerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich bestimmt. Die Bestimmung erfolgt, aufgrund der starken Streuung in der Berechnung, werkstoffgruppenspezifisch. Es ergibt sich eine mittlere Neigung von $k^* = 25$ im Langzeitfestigkeitsbereich. Im Zeitfestigkeitsbereich liegt die Neigung, für die biegebelasteten Proben, bei ca. $k = 7 \dots 8$ und ist unabhängig vom Werkstoff und vom Spannungsverhältnis. Bei Torsionsbelastung ist die Neigung vom Werkstoff abhängig. Für den GJS 800-8 verlaufen die Torsions-Wöhlerlinien deutlich flacher als im Fall Biegung. Für den GJS 1400-1 jedoch steiler. Insgesamt fügen sich die ermittelten Schwingfestigkeiten gut in das aus der Literatur bekannte Bild ein.

Um den Einsatz des Werkstoffs ADI in der Industrie wirtschaftlich zu ermöglichen, ist eine rechnerische Abschätzung der Schwingfestigkeit und damit die Möglichkeit eines rechnerischen Festigkeitsnachweises unabdingbar. Aus diesem Grund soll hier die Möglichkeit der Erbringung eines Schwingfestigkeitsnachweises auf Basis der FKM-Richtlinie [FKM 12] überprüft werden. Die Berechnungsrichtlinie wird gewählt, da sie ein oft genutztes

Standardwerk für die Erbringung eines Schwingfestigkeitsnachweises darstellt. Neben Stahl und Aluminiumwerkstoffen enthält sie auch Eisengusswerkstoffe und dort unter anderen auch die Werkstoffgruppe Kugelgraphitguss (GJS). Somit enthält sie prinzipiell auch die ADI-Werkstoffe, die zu den GJS gehören. Eine explizite Überprüfung der Anwendbarkeit für ADI ist jedoch nicht bekannt.

Für den Festigkeitsnachweis nach [FKM 12] wird zunächst die Bauteilfestigkeit abgeschätzt und diese dann der Belastung unter Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren gegenübergestellt. Da hier die Vorhersagegüte der Richtlinie untersucht werden soll, werden die Sicherheitsfaktoren zu eins gesetzt. Die Bauteilfestigkeit wird ausgehend von der Zugfestigkeit des Werkstoffs berechnet. Zunächst wird die Werkstoff-Wechselfestigkeit auf Basis der Zugfestigkeit abgeschätzt. Hierbei wird ein linearer Zusammenhang zwischen Zug- und Schwingfestigkeit angenommen. Die Werkstoff-Wechselfestigkeit wird anschließend, unter Berücksichtigung der Geometrie und anderer Randbedingungen auf die Bauteilwechselfestigkeit umgerechnet. Mit Hilfe von weiteren Faktoren können auch Mittelspannungs- sowie Schubempfindlichkeit in der Berechnung berücksichtigt werden. In [FKM 12] sind die Faktoren bzw. ihre Bestimmung in Abhängigkeit von der Werkstoffgruppe vorgegeben.

Die Gegenüberstellungen von experimentell ermittelten Schwingfestigkeiten und Berechnungen nach [FKM 12] zeigen, dass die Einflüsse auf die Schwingfestigkeit nach [FKM 12] für die Werkstoffgruppe ADI nicht immer treffend beschrieben werden. Insbesondere für hochfeste Werkstoffe wird die Schwingfestigkeit überschätzt. Die Festigkeit von schubbeanspruchten Bauteilen wird hingegen tendenziell unterschätzt. Weitere Abweichungen ergeben sich bei der Ermittlung der Einflüsse von Geometrie und hochbeanspruchten Bereichen. Insgesamt scheint eine Anwendbarkeit der Richtlinie jedoch bis zu einer Zugfestigkeit von $R_m = 1000 \text{ MPa}$ gegeben. Abweichungen unterhalb dieser Grenze liegen tendenziell auf der konservativen Seite. Damit ist die Betriebssicherheit nicht gefährdet.

Um die Genauigkeit der rechnerischen Auslegung zu erhöhen, werden die Berechnungskonzepte sowie die enthaltenen Faktoren auf Basis der vorliegenden Versuchsergebnisse angepasst. Ziel ist es, die Treffsicherheit der Berechnung zu erhöhen. Somit soll zum einen die Auslegung von Bauteilen aus höherfesten ADI-Werkstoffen ermöglicht werden und zum anderen das Potential des Werkstoffs ADI besser ausgenutzt werden.

Für die Berechnungen wird zunächst die Festigkeit im Langzeitfestigkeitsbereich bzw. bei 10^6 Lastwechseln betrachtet. Diese bildet die Basis für die

Konstruktion von Wöhlerlinien nach [FKM 12]. Für die Anpassung der Berechnung werden die Versuchsdaten der am Institut durchgeführten Versuche sowie die Daten aus [Kahl 05] verwendet. Diese Daten werden gewählt, da hier unterschiedliche Belastungsarten und Spannungsverhältnisse untersucht wurden und die Ergebnisse ausführlich dokumentiert sind. Somit ist eine von der Werkstoffherstellung unabhängige Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Schwingfestigkeit möglich, ohne dass Einflüsse unterschiedlicher Wärmebehandlungsparameter oder Ähnliches die Ergebnisse beeinflussen. Die Optimierung der Berechnung erfolgt zunächst auf Basis einer Parametervariation zur Anpassung des Einflusses von Schubempfindlichkeit, Mittelspannungsempfindlichkeit und Geometrieinfluss in der Berechnung. Die Optimierung wird dabei für unterschiedliche detaillierte Berechnungsvarianten durchgeführt, um den für die Praxis notwendige Detaillierungsgrad beurteilen zu können. Im Anschluss wird der Ansatz zur Bestimmung der Werkstoff-Wechselfestigkeit auf Basis der Zugfestigkeit angepasst.

Es zeigt sich, dass die Berücksichtigung der verformungsmechanischen Stützwirkung die Treffsicherheit der Berechnung erhöht. Die Verbesserung der Treffsicherheit, durch die Berücksichtigung der plastischen Verformung zur Bestimmung der statistischen Stützwirkung erscheint jedoch gering im Vergleich zur deutlich komplexeren Berechnung. Womit dies nicht für weitere Berechnungen genutzt wird.

Für den Schubwechselfestigkeitsfaktor ergibt sich für ADI-Werkstoffe ein Wert von $f_{w,\tau} = 0,84$ und damit eine deutlich geringere Schubempfindlichkeit als sie für Kugelgraphitguss und auch Stahl üblicherweise angenommen wird. Für die Bestimmung der statistischen Stützzahl, auf Basis des hochbeanspruchten Volumens mit Hilfe eines Spannungsintegrals, ergibt sich ein Weibull-Exponent von $k_{st} = 18$. Dieser liegt ebenfalls oberhalb des vorläufigen Wertes nach [FKM 12] von $k_{st} = 10$. Für die Mittelspannungsempfindlichkeit ergeben sich hingegen nur geringe Abweichungen gegenüber der Richtlinie. Allerdings zeigt sich, dass der Ansatz zur Abschätzung auf Basis der Zugfestigkeit nicht immer zutreffend ist. Zur Bestimmung der Werkstoff-Wechselfestigkeit auf Basis der Zugfestigkeit wird zunächst die Verwendung eines quadratischen Ansatzes vorgeschlagen. Dieser kann den Abfall der Schwingfestigkeit hin zu hohen Zugfestigkeiten darstellen. Aber auch ein Ansatz mit Konstanter Werkstoff-Wechselfestigkeit für die Werkstoffgruppe ADI zeigt gute Übereinstimmungen mit experimentellen Versuchsergebnissen.

Neben der auf Basis der experimentellen Daten ermittelten angepassten Berechnung wird ein zweiter Berechnungsansatz vorgeschlagen. Dieser orientiert sich

stärker an Vorgaben der FKM-Richtlinie und soll die Integration der angepassten Berechnung für ADI-Guss in die Richtlinie mit möglichst geringen Anpassungsaufwand ermöglichen. So wird hier auf den quadratischen Ansatz zur Bestimmung der Werkstoff-Wechselspannungsfestigkeit verzichtet und stattdessen eine feste Werkstoff-Wechselspannungsfestigkeit für ADI-Werkstoffe von 380 MPa vorgeschlagen.

Die Überprüfung der angepassten Berechnung zeigt, dass insbesondere hochfeste Werkstoffe und Bauteile unter Schubbeanspruchung deutlich besser abgebildet werden können. Aber auch insgesamt kann die Treffsicherheit der Berechnung erhöht werden. Die Verbesserung ist dabei für beide Anpassungsvarianten deutlich, wobei der quadratische Ansatz der konstanten Werkstoff-Wechselspannungsfestigkeit überlegen ist. Die Vorhersage der Schwingfestigkeit gekerbter Proben erscheint auf Basis der angepassten Berechnungen ebenfalls genauer. Ergebnisse aus einzelnen Quellen [DIN 1564] bestätigen dies jedoch nicht vollständig, weshalb hier weitere Untersuchungen notwendig sind.

Bei der Konstruktion der Wöhlerlinien zeigt sich, dass durch die Anpassung der Neigung im Zeit- und Dauerfestigkeitsbereich auf mittlere experimentell bestimmte Werte die Streuung zwischen experimentellen Einzelversuchsergebnissen und rechnerischen Festigkeiten reduziert werden kann. Da diese Neigungen von den in der FKM-Richtlinie gegebenen Neigungen abweichen, ist eine Integration jedoch mit großem Aufwand verbunden. Alternativ wird vorgeschlagen, anstatt des Wöhlerlinien Typ 1, wie er in der FKM-Richtlinie für den Werkstoff GJS vorgesehen ist, den Wöhlerlinien Typ 2 für ADI-Werkstoffe zu verwenden. Dieser weist im Bereich von 10^6 bis 10^8 Lastwechseln eine abfallende Langzeitfestigkeit auf und spiegelt damit die experimentellen Ergebnisse besser wider.

Insgesamt zeigt der Werkstoff ADI ein großes Potential für den Einsatz in zyklisch belasteten Bauteilen. Insbesondere die Werkstoffe bis zu einer Zugfestigkeit von ca. 1100 MPa weisen sehr gute Schwingfestigkeitseigenschaften in Verbindung mit guter Dehnbarkeit auf. Mit der vorgestellten, angepassten Berechnung ist eine verbesserte rechnerische Auslegung möglich, womit die Hürden für den praktischen Einsatz in hochbeanspruchten Bauteilen gesunken sind. Trotzdem ist die Fertigung von insbesondere dickwandigen Bauteilen aus ADI komplex und bedarf einer umfassenden Kontrolle des entstandenen Gefüges. Ergebnisse aus [LEA 11] und [Lin 96] zeigen zwar, dass auch bereits unvollständig umgewandelte Gefüge erhöhte Schwingfestigkeiten gegenüber einem klassischen GJS aufweisen, das volle Potential kann in diesem Fall jedoch nicht ausgeschöpft werden. Insbesondere muss hier beachtet werden, dass die Zugfestigkeit allein nicht zur Beurteilung der Werkstoffqualität ausreicht.

3 Stand der Technik

In diesem Kapitel ist der Stand der Technik in Bezug auf die Schwingfestigkeit von ADI dargestellt. Zunächst sind die wesentlichen Größen in der Schwingfestigkeitsbetrachtung sowie ihre Bestimmung dargestellt. Im Anschluss wird der behandelte Werkstoff ADI vorgestellt. Neben der Herstellung und den allgemeinen Eigenschaften sind für die vorliegende Arbeit vor allem vorliegende Ergebnisse zur Schwingfestigkeit interessant. In einem weiteren Punkt wird die FKM-Richtlinie [FKM 12] kurz vorgestellt. Sie bildet die Grundlage für die in der Arbeit durchgeführten Berechnungen.

3.1 Schwingfestigkeit

Die Festigkeitsgrenze von Bauteilen wird bei schwingender Beanspruchung deutlich früher erreicht als bei einer rein statischen Beanspruchung. Die ertragbare Last ist damit von der Häufigkeit bzw. der Anzahl der Lastwechsel abhängig, [Gude 99]. Zur Darstellung des Zusammenhangs wird die Lastamplitude über der ertragbaren Schwingenspielzahl im Wöhlerdiagramm dargestellt, Abbildung 3.1. Durch die Verwendung einer logarithmischen Achsenskalierung, kann die Wöhlerlinie in drei lineare Bereiche eingeteilt werden. In der vorliegenden Arbeit liegt der Schwerpunkt auf der Zeit- sowie auf der Langzeitfestigkeit, weshalb diese genauer betrachtet werden sollen.

Im Zeitfestigkeitsbereich, von ca. $4 \cdot 10^4$ bis $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln, wird die Wöhlerlinie als Gerade nach dem Ansatz von Basquin [Basq 10] beschrieben, Gleichung (3.1).

$$N = C \cdot L_a^{-k} \quad (3.1)$$

N	Schwingenspielzahl
C	Konstante zur Beschreibung der Lage
L_a	Lastamplitude
k	Neigung der Wöhlerlinie

Im Langzeitfestigkeitsbereich wird für viele übliche Stähle von einer ausgeprägten Dauerfestigkeit und damit einem konstanten Verlauf der Wöhlerlinie ausgegangen. Andere Werkstoffe, wie z.B. Aluminium und austenitische Stähle, verfügen nicht über eine ausgeprägte Dauerfestigkeit. Hier wird von einem weiteren Abfall der Festigkeit ausgegangen, Abbildung 3.1 gestrichelte Linie.

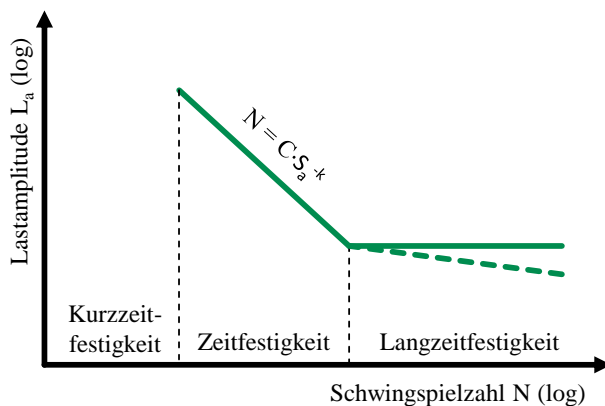


Abbildung 3.1: Wöhlerdiagramm schematisch

Im Versuch werden die Belastungen im Allgemeinen in Form von Sinusschwingungen aufgebracht, Abbildung 3.2. Diese können durch die Spannungsamplitude S_a und das Spannungsverhältnis R beschrieben werden, Gleichung (3.2), [Haib 06].

$$R = \frac{S_u}{S_o} \quad (3.2)$$

S_u, S_o Unterspannung, Oberspannung

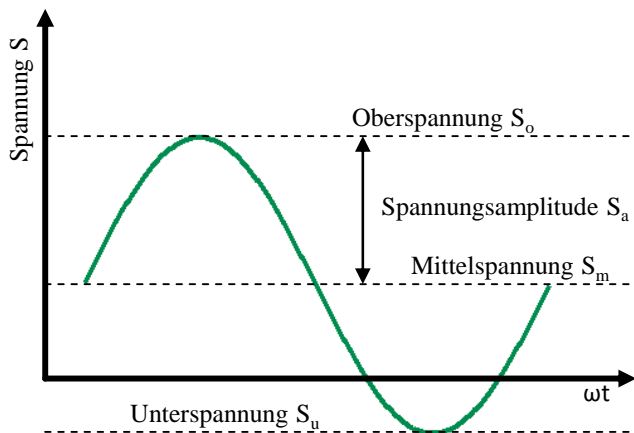


Abbildung 3.2: Sinusförmige Belastung

3.1.1 Bestimmung der Zeitfestigkeitsgeraden

Zur Bestimmung der Zeitfestigkeitsgeraden existieren mehrere Verfahren. In der vorliegenden Arbeit wird das Perlenschnurverfahren genutzt. Dabei werden spannungskontrollierte Versuche im Bereich von ca. 10^4 bis 10^6 Lastwechseln bis zum Bruch der Probe durchgeführt. Die Versuche werden auf unterschiedlichen Lasthorizonten durchgeführt, wobei mehrere Versuche auf einen Lasthorizont zulässig sind. Dabei ist eine Anordnung der Einzelversuche nahe der Übergangsbereiche zur Lang- bzw. Kurzzeitfestigkeit anzustreben, um eine möglichst genaue Bestimmung der Wöhlerlinienneigung zu gewährleisten, [Mart 11]. Lasthorizonte auf denen Durchläufer auftreten werden, aufgrund ihrer Lage im Übergangsbereich zur Langzeitfestigkeit, nicht zur Auswertung herangezogen. Die Ermittlung der Zeitfestigkeitsgeraden erfolgt durch Regression mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate in Schwingungszahlrichtung, Abbildung 3.3. Die Merkmalswerte sind dabei logarithmiert einzusetzen. Dieses Vorgehen entspricht der [DIN 50100].

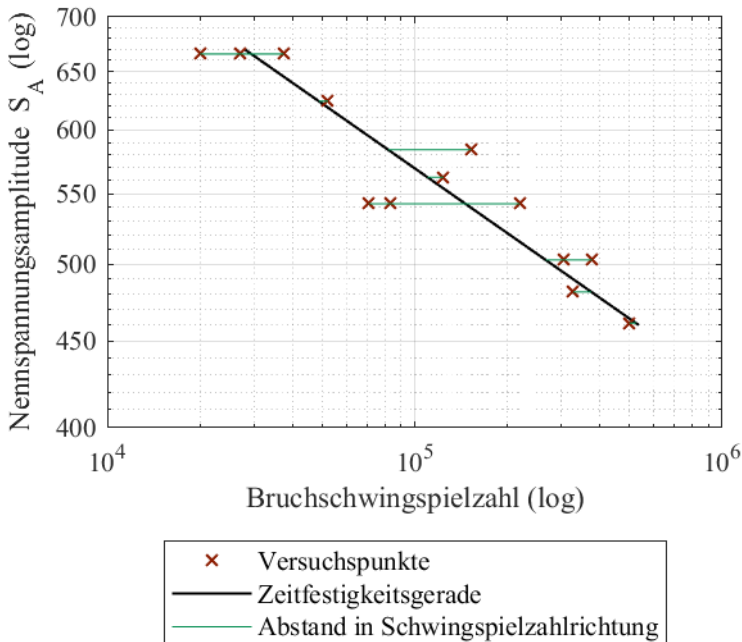


Abbildung 3.3: Beispielhafte Darstellung der Bestimmung der Zeitfestigkeitsgeraden (GJS 800-8, $R = -1$)

3.1.2 Bestimmung der Langzeitfestigkeit

Die Langzeitfestigkeit kann auf Basis unterschiedlicher Verfahren ermittelt werden. Am häufigsten werden das Treppenstufenverfahren, [Dixo 48], das Probit-Verfahren, [Finn 47] und das Abgrenzungsverfahren [Maen 77] genannt. Hier erfolgt die Versuchsdurchführung nach dem Treppenstufenverfahren, Abbildung 3.4. Ausgewertet werden die Versuche nach [DIN 50100], [Hück 83]. Der Startwert sowie der Stufensprung können aus den Ergebnissen für die Zeitfestigkeit bzw. auf Basis von Erfahrungen aus vorangegangenen Versuchsreihen abgeschätzt werden. Die Grenzlastschwingungszahl wird auf $N_G = 10^7$ Lastwechsel festgelegt.

		Probe															
		F2	F3	F1	G1	F4	H2	H4	H1	H3	G4	G2	G3	I1	I2	I3	
S _A in MPa	415,5																
	400,0	x				x		x		x		x					x
	385,1		x		o		o		o		o		x			o	
	370,7			o											o		
	356,8																
Schwingungszahl		9.331.139	362.281	10.000.000	10.000.000	4.965.821	10.000.000	258.144	10.000.000	2.419.198	10.000.000	8.882.876	6.469.837	10.000.000	10.000.000	1.865.025	

"x": Bruch; "o": Durchläufer

Abbildung 3.4: Beispielhafte Darstellung der Treppenstufenversuche (GJS 1400-I, $R = -1$)

Abweichend zur [DIN 50100] werden die Langzeitfestigkeitsversuche für die Flachbiegeversuche mit dem Spannungsverhältnis $R = -1$ am Werkstoff GJS 800-8 nach der Maximum-Likelihood-Methode ausgewertet. Das Ergebnis stellen dabei die Werte für die mittlere Langzeitfestigkeit und die Standardabweichung dar, für die Gleichung (3.3) maximal wird, [Liu 01]. Diese Methode ermöglicht die Auswertung der nicht geschlossenen Treppenfolge mit einer vergleichbaren Ergebnislage wie sie eine Auswertung nach [Hück 83] hätte, [Müll 15]. Die abweichende Auswertung ist hier notwendig, da der Stufensprung in der Versuchsdurchführung zunächst zu groß gewählt wurde. Durch zusätzliche Versuche auf nachträglich eingefügten Laststufen, ist die Treppenstufenfolge nicht mehr geschlossen, wodurch eine Auswertung nach [Hück 83] nicht möglich ist.

$$P = \prod_{i=1}^{i_{max}} P_{A,i}^{n_{B,i}} \cdot (1 - P_{A,i})^{n_{D,i}} \quad (3.3)$$

i	Nummer des belegten Lasthorizonts
$P_{A,i}$	Ausfallwahrscheinlichkeit für Lasthorizont i
$n_{B,i}$	Anzahl der Brüche auf Lasthorizont i
$n_{D,i}$	Anzahl der Durchläufer auf Lasthorizont i

3.1.3 Dehnungsgeregelte Versuche

Bei dehnungsgeregelten Versuchen wird nicht die Spannung, sondern die Dehnung vorgegeben. Zur Anwendung kommen dehnungsgeregelte Versuche vor allem im Bereich der Kurzzeitfestigkeit, da hier bei spannungsgeregelten Versuchen starkes Kriechen auftritt. Außerdem bereitet bei spannungsgeregelten Versuchen die Regelung des Versuchsstandes, aufgrund des nichtlinearen Werkstoffverhaltens bei plastischer Verformung, Probleme. Im Unterschied zu spannungsgeregelten Versuchen erfolgt die Versuchsauswertung bei dehnungsgeregelten Versuchen meist beim Anriss der Probe. Der Anriss wird dabei meist durch einen Spannungsabfall definiert, z.B. 10 % nach Stahl-Eisen-Prüfblatt [SEP 1240]. ADI zeigt in den Versuchen ein sehr sprödes Bruchverhalten, so dass im Versuch bei 10 % Spannungsabfall oft schon ein Bruch der Probe vorliegt. Aus diesem Grund wird hier die Anrisschwingspielzahl mit der Bruchschwingspielzahl gleichgesetzt. Das Ergebnis der dehnungsgeregelten Versuche bilden die Dehnungswöhlerlinie sowie das zyklische Spannungs-Dehnungs-Diagramm.

Die Dehnungswöhlerlinie wird nach dem Ansatz von Coffin [Coff 54] und Manson [Mans 65] mit Hilfe von Gleichung (3.4) [Gude 99] beschrieben.

$$\varepsilon_{a,ges} = \varepsilon_{a,el} + \varepsilon_{a,pl} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b + \varepsilon'_f (2N)^c \quad (3.4)$$

$\varepsilon_{a,ges}$	Gesamtdehnungsamplitude
$\varepsilon_{a,el}$	Elastischer Anteil der Dehnungsamplitude
$\varepsilon_{a,pl}$	Plastischer Anteil der Dehnungsamplitude
E	Elastizitätsmodul
σ'_f	Zyklischer Schwingfestigkeitskoeffizient
b	Zyklischer Schwingfestigkeitsexponent

ε'_f	Zyklischer Duktilitätskoeffizient
c	Zyklischer Duktilitätsexponent

Die Ermittlung der Kennwerte erfolgt durch Regression. Diese wird getrennt für die elastische und für die plastische Dehnung durchgeführt. Die Regression erfolgt nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate in Richtung der Schwingspiele. Das zyklische Spannungs-Dehnungs-Diagramm wird nach dem Ansatz von Ramberg und Osgood [Ramb 43] mit Gleichung (3.5) [Haib 06] beschrieben. Die Bestimmung der Parameter erfolgt mit Hilfe der Kompatibilitätsbedingungen, Gleichung (3.6) und (3.7) [Seeg 96].

$$\varepsilon_{a,ges} = \varepsilon_{a,el} + \varepsilon_{a,pl} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (3.5)$$

σ_a	Spannungsamplitude
K'	Zyklischer Verfestigungskoeffizient
n'	Zyklischer Verfestigungsexponent

$$n' = \frac{b}{c} \quad (3.6)$$

$$K' = \frac{\sigma'_f}{(\varepsilon'_f)^{n'}} \quad (3.7)$$

3.1.4 Rissinitiierung unter schwingender Last

Die bei einer schwingenden Belastung auftretende plastische Verformung im Werkstoff führt zur Rissbildung und damit schließlich zum Versagen des Bauteils. Bei entsprechend hohen Belastungen können die plastischen Verformungen, die schließlich zum Versagen führen, messtechnisch, global erfasst werden. Bei Belastungen im Bereich der Dauer- bzw. Langzeitfestigkeit treten die plastischen Verformungen nur noch lokal in den Körnern der Mikrostruktur des Werkstoffs auf, [Munz 71], [Chri 09].

Im Allgemeinen entstehen die Risse, die schließlich zum Versagen führen, an der Bauteiloberfläche. Dies liegt zum einen an oft höheren Spannungen an der Bauteiloberfläche, wie sie z.B. durch Biege- oder Torsionsbelastungen hervorgerufen werden. Aber auch Kerben durch eine raue Oberfläche begünstigen das

Versagen an der Oberfläche. Ein Blick auf die Makrostruktur zeigt, dass weitere Effekte auf dieser Ebene ebenfalls die Rissbildung an der Oberfläche begünstigen. So kann die Kristallstruktur an der Oberfläche, aufgrund des ebenen Spannungszustands an der freien Oberfläche, leichter verformt werden. Die damit größeren plastischen Verformungen begünstigen die Rissbildung. Weiterhin kann die umgebende Atmosphäre die Rissbildung begünstigen, [Munz 71].

Gusswerkstoffe enthalten jedoch oft Einschlüsse oder fertigungsbedingte Poren die ebenfalls Ausgangspunkte für Kerben darstellen können. Abhängig von der Größe und Lage der Fehlstellen können sie die Schwingfestigkeit unterschiedlich stark beeinflussen. Dabei ist die Reduktion der Schwingfestigkeit bei Fehlern in der Oberfläche größer als bei inneren Fehlstellen, [Mura 02]. Bei Anrissen aus dem Bauteilinneren weist die Bruchflächen oft einen helleren Bereich um die rissinitierende Fehlstelle auf, Abbildung 3.5. Dieses Phänomen ist als Fischauge bekannt, [Chri09], [Mura 02].

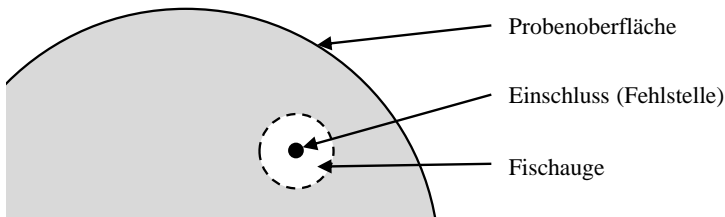


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung einer Bruchfläche mit Fischauge, in Anlehnung an [Mura 02]

Zur Bewertung von Fehlstellen im Werkstoff kann der Parameter \sqrt{area} genutzt werden. Dieser beschreibt die Größe einer Fehlstelle, als Wurzel der Projektionsfläche $area$ des Fehlers auf die Ebene senkrecht zur maximalen Spannung [Mura 02]. Für die Bewertung der Fehler werden diese dann häufig mit Rissen gleichgesetzt. Die Dauerfestigkeit entspricht damit der Belastung, bei der kein Risswachstum auftritt [Mura 02].

3.2 Der Werkstoff ADI

Austempered Ductile Iron (ADI) ist ein wärmebehandeltes Gusseisen mit Kugelgraphit. Durch die Wärmebehandlung wird ein Werkstoff mit, gegenüber dem Ausgangswerkstoff, verbesserten Festigkeits- und Dehnungseigenschaften erreicht.

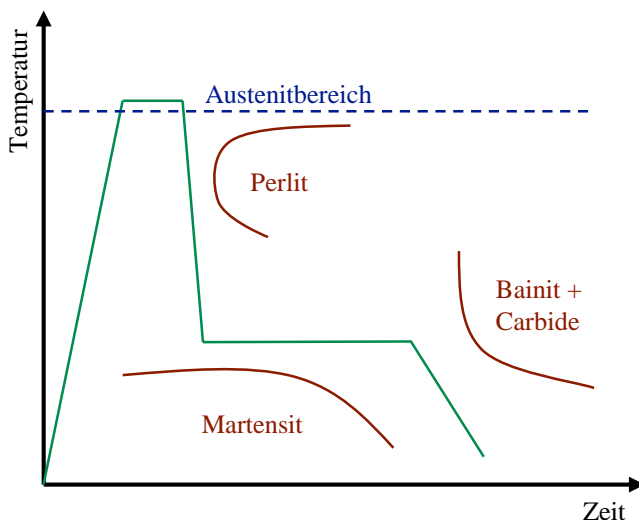


Abbildung 3.6: Schematisches Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Diagramm für ADI nach [Hass 96]

Der Ablauf der Wärmebehandlung ist in Abbildung 3.6 skizziert. Zunächst wird das Bauteil in den Austenitbereich, ca. 820 – 950 °C, erwärmt. Hiermit wird eine Umwandlung des Gefüges aus Perlit und Ferrit in Austenit erreicht. Durch Diffusion aus den Graphitkugeln erhöht sich dabei der Kohlenstoffgehalt im Austenit. Anschließend erfolgt eine schnelle Abkühlung auf die Auslagerungstemperatur von ca. 250 – 450 °C. Die Abkühlung muss hierbei schnell genug erfolgen, um die Bildung von Perlit zu vermeiden. Höhere Auslagerungstemperaturen führen zu einem Werkstoff mit geringerer quasistatischer Festigkeit und Härte, dafür aber höherer Bruchdehnung. Geringere Auslagerungstemperaturen führen zu härtesten Werkstoffen mit geringerer Dehnbarkeit. Die Haltezeiten liegen im Bereich von ca. 0,5 – 4 h und sind von der Auslagerungstemperatur und der Legierungszusammensetzung abhängig. Durch die Auslagerung entsteht ein Gefüge aus Ausferrit. Dieses besteht aus Austenit mit eingelagerten

Ferritnadeln, Abbildung 3.7. Eine zu kurz gewählte Haltezeit führt zur Martensitbildung, wobei ein zu langes Halten der Auslagerungstemperatur zur Bildung von Carbiden führt. Beides ist im ADI-Gefüge unerwünscht. [Hass 96], [Saal 16]

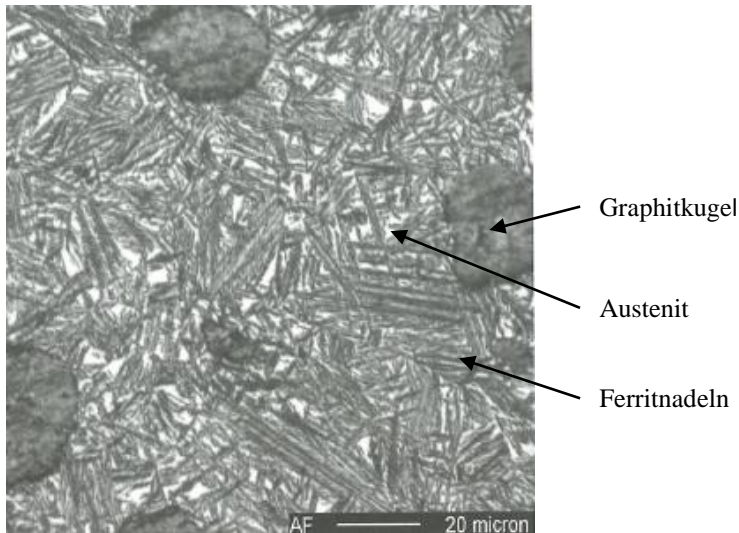


Abbildung 3.7: Grundgefüge eines ADI-Werkstoffs [Hass 08]

Der Werkstoff ADI ist in der [DIN EN 1564] „Gießereiwesen - Ausferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit“ genormt. Die Werkstoffeinteilung erfolgt hier nach Festigkeitsklassen. Die Zugfestigkeit liegt im Bereich von 800 bis 1400 MPa bei Bruchdehnungen von 1 bis 10 %. Eine weitere Standardisierung liegt mit der [ASTM 897M-90] vor. Die Normen schreiben keine Legierungsbestandteile und auch keine chemischen Zusammensetzungen vor, womit diese vom jeweiligen Gießer unterschiedlich gewählt werden können.

3.3 Schwingfestigkeit von ADI

Der Werkstoffgruppe ADI werden in der Literatur viele, zumeist positive Eigenschaften zugeschrieben. Einige davon treffen belegbar zu, bei anderen fehlen belastbare experimentelle Ergebnisse. Im Folgenden werden die bekannten Untersuchungsergebnisse kurz dargestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den für diese Arbeit relevanten Schwingfestigkeitsuntersuchungen.

In [DIN 1564] ist der Werkstoff „Ausferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit“ und damit ADI genormt. Hier sind neben allgemeinen Anforderungen, Probenformen und Prüfverfahren auch Mindest-Werkstoffkennwerte gegeben. Die Benennung der unterschiedlichen Werkstoffe erfolgt wie in Abbildung 3.8 dargestellt. Unter anderem sind in [DIN 1564] auch Langzeitfestigkeiten für Grenzlastschwingenspielzahlen von $N_G = 2 \cdot 10^6$ Lastwechsel gegeben, vgl. Tabelle 3.1. Den Ergebnissen ist zu entnehmen, dass die Langzeitfestigkeit zunächst mit steigender Zugfestigkeit zunimmt. Der Anstieg der Langzeitfestigkeit ist jedoch nicht proportional zum Anstieg der Zugfestigkeit, und fällt bei $R_m = 1400$ MPa wieder deutlich ab. Die gekerbten Proben haben einen umlaufenden 45° V-Kerb mit einem Kerbradius von 0,25 mm. Das Verhältnis von Langzeitfestigkeit der gekerbten Probe zur ungekerbten Probe ist für alle Festigkeitsklassen nahezu konstant bei 0,6. Lediglich beim hochfesten Werkstoff GJS 1400-1 ist die Kerbempfindlichkeit etwas geringer.

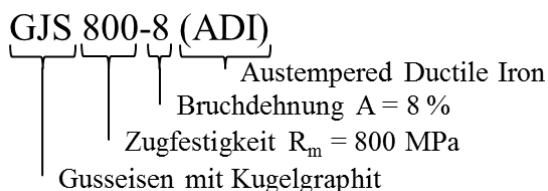


Abbildung 3.8: Benennung ADI-Werkstoffe [DIN 1564]

Tabelle 3.1: Kennwerte aus [DIN 1564] für Wanddicken $t < 30$ mm

Werkstoff	Zugfestigkeit R_m	Bruchdehnung A	Langzeitfestigkeit	
			Ungekerbt; $N_G = 2 \cdot 10^6$	Gekerbt; $N_G = 2 \cdot 10^6$
EN-GJS-800-10	800 MPa	10 %	375 MPa	225 MPa
EN-GJS-900-8	900 MPa	8 %	400 MPa	240 MPa
EN-GJS-1050-6	1050 MPa	6 %	430 MPa	265 MPa
EN-GJS-1200-3	1200 MPa	3 %	450 MPa	280 MPa
EN-GJS-1400-1	1400 MPa	1 %	375 MPa	275 MPa

Im Folgenden werden weitere Quellen und die jeweils enthaltenen Ergebnisse und Untersuchungen kurz dargestellt.

Die Ergebnisse aus [Bahm 97] zeigen, dass die Schwingfestigkeit von ADI-Guss nicht proportional mit der Zugfestigkeit ansteigt. Für die Schwingfestigkeit ist die Mikrostruktur entscheidend. Wird die Ausferritisierungstemperatur zu niedrig und kurz gewählt, entsteht Martensit, ist die Haltezeit zu lang, entstehen Carbide. Beide Gefüge-Bestandteile wirken sich negativ auf die Schwingfestigkeit aus.

Die Ergebnisse von [Shan 94] decken sich in weiten Teilen mit denen von [Bahm 97]. Es werden die Einflüsse der Wärmebehandlungstemperaturen und Haltezeiten untersucht. Es wird gezeigt, dass eine höhere Zugfestigkeit nicht immer eine höhere Schwingfestigkeit zur Folge hat.

In [LEA 11] wird ein Simulationsmodell zur Verbesserung des Wärmebehandlungsprozesses von ADI-Guss entwickelt. Es ermöglicht die Optimierung der drei Prozessschritte: Austenitisieren, Abschrecken und Ausferritisieren mit dem Ziel einer vollständigen Umwandlung des Gefüges in Ausferrit. Außerdem werden in [LEA 11] umfangreiche Schwingversuche durchgeführt. Untersucht werden unterschiedliche Werkstoffchargen sowie gekerbte und ungekerbte Proben. Es werden sowohl spannungsgeregelte als auch dehnungsgeregelte Einstufenversuche durchgeführt. Neben einstufigen Versuchen werden auch Versuche mit variabler Amplitude durchgeführt.

In [Schö 15] werden unterschiedliche Gusseisenwerkstoffe untersucht. Unter anderem findet sich ein MADI, der einem ADI mit einer Zugfestigkeit von $R_m = 800 \text{ MPa}$ entspricht. Enthalten sind Schwingversuche mit unterschiedlich stark gekerbten Proben sowie dehnungsgeregelte Versuche. Außerdem ist ein Vergleich mit der FKM-Richtlinie [FKM 12] enthalten.

In [Hein 12] wird die Fertigung von Schwenklagern und Radnaben aus ADI-Guss untersucht. Ergebnisse von Versuchen an Werkstoffproben sind ebenfalls enthalten. Es wird gezeigt, dass ADI ein hohes Potential bietet. Hohe Sonderlasten führen hier nicht zu einer erkennbaren Lebensdauerverkürzung. Weitere Ergebnisse zeigen das Potential von nur teilweise umgewandelten Gefügen.

In [Khal 05] sind Langzeitfestigkeiten nach dem Treppenstufenverfahren für unterschiedliche ADI-Werkstoffe bei Axial-, Biege- und Torsionsbelastungen enthalten. Die Ergebnisse liegen als Einzelversuchsergebnisse vor.

In [Wohl 11a] und [Wohl 11b] wird der Einfluss der Wandstärke des Gussrohlings auf die Schwingfestigkeit untersucht. Es wird gezeigt, dass Risse fast ausschließlich von Mikroporositäten ausgehen. Weiterhin wird gezeigt, dass die Schwingfestigkeit mit längeren Erstarrungszeiten und geringerer Anzahl von Graphitkugeln abnimmt. Damit lässt sich das Werkstoffverhalten abhängig vom Gefüge qualitativ beschreiben. Des Weiteren wird die Schwingfestigkeit an Proben mit Gussoberfläche untersucht. Diese hat eine schwingfestigkeitsverringende Wirkung, die durch die raue Oberfläche sowie das örtliche Gefüge zu erklären ist. In [Wohl 10] wird unter anderem der Einfluss der Entnahmeposition aus dem Gussrohling untersucht. Es wird eine leichte Schwingfestigkeitsreduktion für Proben mit zentral im Rohling gelegener Entnahmeposition gezeigt.

[Baue 05] hat die Biegeweichfestigkeit von Gusseisen mit Kugelgraphit unter dem Gesichtspunkt der Auswirkungen der Gusshaut untersucht. Im Versuchsprogramm sind dabei unter anderem zwei ADI-Werkstoffe enthalten. Es zeigt sich, dass Einflüsse der Gusshaut, wie Oberflächenrauheit und Gefüge, die Schwingfestigkeit stark herabsetzen und die Vorteile gegenüber einem klassischen GJS-Werkstoff verringern.

[Chap 06] untersucht den Einfluss von Kerben auf die Schwingfestigkeit von ADI-Proben. Der untersuchte Werkstoff ADI Grade 2 nach [ASTM 897M-90] ist vergleichbar mit einem GJS 1050-6 nach [DIN 1564]. Untersucht werden drei unterschiedlich stark gekerbte Probengeometrien sowie eine ungekerbte Probe. Die Auswertung erfolgt mit einem bruchmechanischen Ansatz. Graphitkugeln bilden die Rissausgangspunkte. Die Risse wachsen entlang der Ferritnadeln und können durch quer orientierte Ferritnadeln gestoppt werden.

Untersuchungen in [Vask 09] zeigen eine Abnahme der Schwingfestigkeit durch die Wärmebehandlung. Die Wärmebehandlung führt mit abnehmenden Halte Temperaturen zu steigenden Zugfestigkeiten. Die Schwingfestigkeit nimmt mit steigender Zugfestigkeit ab. Die Versuche sind hier an einem 20-KHz-Prüfstand durchgeführt. Es fehlt die Dokumentation zur Versuchsdurchführung. Grenzlastschwingspielzahlen, Probenanzahlen und Auswerteverfahren sind nicht angegeben.

In den Quellen [Lin 96 a, Lin 96 b] sind Umlaufbiegeversuche sowie LCF-Versuche enthalten. Aufbauend darauf werden die Einflüsse der Wärmebehandlung und des Gefüges untersucht. Es wird gezeigt, dass höhere Auslagerungstemperaturen zu höheren Dehnungen und auch zu höheren Langzeitfestigkeiten führen und diese damit nicht von der Zugfestigkeit oder Dehnung abhängig ist. Die Graphitkugeln im Werkstoff beeinflussen die

Schwingfestigkeit. Eine kleine, möglichst runde Kugelausbildung wirkt sich, besonders bei hochfesten Werkstoffen, positiv aus. Die Untersuchungen des Gefüges ergaben außerdem, dass Austenitbereiche ohne Ferritnadeln weniger stabil sind und damit eher, unter mechanischer Beanspruchung, in Martensit umgewandelt werden. Dies hemmt den Rissfortschritt bei den Langzeitfestigkeitsversuchen wirkt sich jedoch bei LCF-Versuchen durch eine Versprödung der Probe negativ aus.

In [Lin 98] wird der Einfluss von Kerben auf zwei unterschiedlich feste ADI-Werkstoffe untersucht. Untersucht werden Axial- und Umlaufbiegebelastungen sowie unterschiedliche Kerbformen.

In [Gilb 86] sind umfassende Untersuchungsergebnisse für unterschiedliche ADI-Werkstoffe enthalten. Einzelversuchsergebnisse sind jedoch nicht angegeben.

In [Vett 99] und [Bösc 89] wird unter anderem die verformungsinduzierte Umwandlung von Austenit in Martensit beobachtet. In [Bösc 89] ist die Martensitumwandlung kurz vor dem Erreichen der Zugfestigkeit gezeigt. In [Vett 99] zeigte sich eine Martensitumwandlung im Kerbgrund von schwingbelasteten Proben.

Die oben dargestellten Quellen zeigen einen Überblick über den derzeitigen Erkenntnisstand zur Schwingfestigkeit von ADI-Gussbauteilen. Es existieren bereits viele, zum Teil relativ umfangreiche Untersuchungen. Es fehlen jedoch nahezu vollständig Untersuchungen zum Einfluss von Mittelspannungen. Nahezu alle Untersuchungen sind bei rein wechselnder Beanspruchung durchgeführt. Auch Untersuchungen unter Schubbeanspruchungen sind nur vereinzelt vorhanden. Bei vielen gegebenen Versuchsergebnissen fehlen in den Datensätzen Angaben, wie z.B. die Probengeometrie, Einzelversuchsergebnisse oder Werkstoffkennwerte. Damit ist eine Weiterverwendung der Ergebnisse oft nur bedingt möglich.

Mit der rechnerischen Auslegung von Bauteilen aus ADI befassen sich nur wenige Quellen. Vereinzelt werden Ansätze vorgestellt und Zusammenhänge erläutert, [Chap 06], [Lin 96], ein anwendbarer Festigkeitsnachweis ist nicht enthalten. In [Schö 15] wird ein exemplarischer Abgleich mit der FKM-Richtlinie [FKM 12] durchgeführt. Auf die genaue Anwendung wird jedoch nicht eingegangen.

3.4 Die FKM-Richtlinie

Die FKM-Richtlinie [FKM 12] stellt ein Standardwerk für die Erbringung des rechnerischen Festigkeitsnachweises dar. Sie umfasst den Statischen sowie den Ermüdungsfestigkeitsnachweis, wobei beide sowohl mit Nennspannungen als auch mit örtlichen Spannungen durchgeführt werden können. Die Spannungsberechnung erfolgt jeweils auf der Grundlage von linear-elastischem Materialverhalten. Gültig ist die Richtlinie für Stahl, Eisengusswerkstoffe und Aluminiumwerkstoffe. Für Stahl ist eine maximale Zugfestigkeit von $R_m = 1250$ MPa als Anwendungsgrenze angegeben. Eine Anwendbarkeit der gegebenen Algorithmen ist jedoch unter erhöhter Vorsicht bis zu einer Zugfestigkeit von $R_m = 1600$ MPa zulässig. Für Aluminiumwerkstoffe liegt die Grenze bei $R_m = 610$ MPa und für Eisengusswerkstoffe ist keine angegeben. Weitere Anwendungsgrenzen, die für den in dieser Arbeit vorliegenden Fall weniger relevant sind, können der Richtlinie [FKM 12] entnommen werden.

Der untersuchte Werkstoff ADI-Guss ist ein Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS) und als solcher in der FKM-Richtlinie enthalten. ADI-Guss ist jedoch aufgrund seiner, durch die Wärmebehandlung hervorgerufenen, besonderen Eigenschaften kein klassischer Kugelgraphitguss. Dies wird in der FKM-Richtlinie nicht berücksichtigt, was wahrscheinlich der historischen Entwicklung des Regelwerks und der noch vergleichsweise geringen Verbreitung des ADI zugeschrieben werden muss. Aus diesem Grund soll die Anwendbarkeit überprüft werden. Der untersuchte Werkstoff GJS 800-8 (ADI) liegt mit einer Zugfestigkeit von $R_{m,N} = 800$ MPa im typischen Anwendungsbereich der FKM-Richtlinie für Stahl. Der zweite untersuchte Werkstoff, GJS 1400-1 (ADI), liegt mit einer Zugfestigkeit von $R_{m,N} = 1400$ MPa oberhalb der eigentlichen Anwendungsgrenze für Stahl, jedoch noch in dem Bereich, in dem eine Anwendbarkeit bei erhöhter Vorsicht gegeben ist.

Mit der FKM-Richtlinie können sowohl statische Festigkeitsnachweise als auch Ermüdungsfestigkeitsnachweise erbracht werden. In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus auf der Schwingfestigkeit von ADI-Gussbauteilen, der statische Festigkeitsnachweis wird nicht betrachtet.

Prinzipiell ist das Vorgehen zur Erbringung eines Festigkeitsnachweises in der FKM-Richtlinie wie folgt: Zunächst wird die Bauteilfestigkeit bestimmt. Hierzu wird auf Basis der statischen Zugfestigkeit, unter Berücksichtigung von Bauteileigenschaften wie z.B. Geometrie, Oberfläche und Größe, aber auch unter Berücksichtigung von Belastungscharakteristika wie z.B. der Mittelspannungen, die Bauteilfestigkeit berechnet. Diese wird unter Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren der Beanspruchung gegenübergestellt. Die so bestimmten

Auslastungsgrade müssen unter 1 liegen, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten.

Zunächst wird aus der Zugfestigkeit, im Fall von Normalspannungen, mit dem Zugdruckwechselfestigkeitsfaktors $f_{w,\sigma}$ die Werkstoff-Wechselfestigkeit $\sigma_{w,zd}$ abgeschätzt. Aus dieser kann anschließend durch Multiplikation mit dem Konstruktionsfaktor K_{WK} , die Bauteil-Wechselfestigkeit σ_{WK} berechnet werden, Abbildung 3.9.

Der Konstruktionsfaktor berücksichtigt unter anderem die Einflüsse aus Geometrie und Oberfläche. Für die genutzten Versuchsdaten von Proben mit unbehandelter Oberfläche, ist hier vor allem die Stützzahl n_σ von Bedeutung. Zur Bestimmung der Stützzahl stehen in der FKM-Richtlinie zwei Verfahren zur Verfügung. Dies sind die Stützzahlen nach dem Stielerschen Stützwirkungskonzept, die im Wesentlichen vom vorliegenden bezogenen Spannungsgradienten abhängig sind, sowie die werkstoffmechanischen Stützzahlen, die unter anderem auch den statistischen Größeneinfluss berücksichtigen. Hier werden die werkstoffmechanischen Stützzahlen genutzt. Da dieses genauer und physikalisch begründet die unterschiedlichen Einflüsse erfasst.

Unterschiedliche Spannungsverhältnisse werden über den Mittelspannungsfaktor berücksichtigt. Dieser wird in Abhängigkeit vom Lastfall auf Basis der Mittelspannungsempfindlichkeit bestimmt. Diese wird wiederum in Abhängigkeit von Werkstoffgruppe und Zugfestigkeit abgeschätzt.

In vielen Bauteilen treten neben Normalspannungen auch Schubspannungen auf, z.B. unter Torsionsbelastung. Die oft geringere Schubfestigkeit wird auf Basis des Schubwechselfestigkeitsfaktors $f_{w,\tau}$ berücksichtigt.

Die Berechnungen erfolgen in [FKM 12] dabei jeweils für eine Ecklastschwingspielzahl von $N_D = 10^6$ Lastwechsel. Die Wöhlerlinie wird mit einer konstanten Neigung von $k = 5$ für Normalspannungen und $k = 8$ für Schubspannungen im Zeitfestigkeitsbereich konstruiert. Im Langzeitfestigkeitsbereich wird zwischen Typ I, einer konstanten Dauerfestigkeit, und Typ II, einem weiteren Abfall der Langzeitfestigkeit bis 10^8 Lastwechsel, unterschieden. Für den vorliegenden GJS ist hier, nach Richtlinie, Typ I zu wählen, [FKM 12].

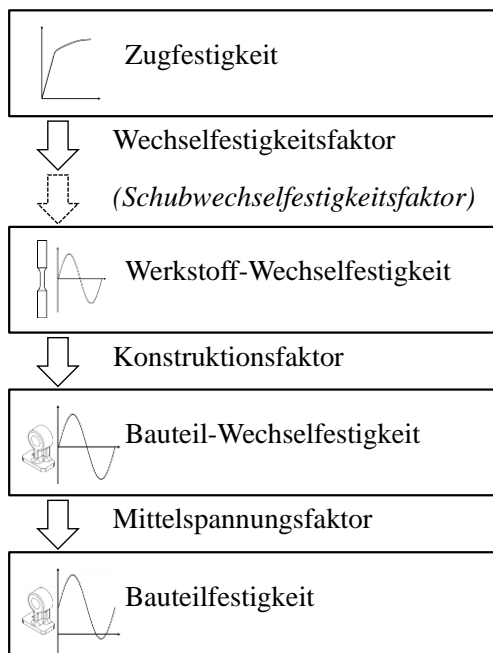


Abbildung 3.9: Bestimmung der Bauteilfestigkeit nach FKM-Richtlinie

In der vorliegenden Arbeit soll die Anwendbarkeit der Richtlinie überprüft werden. Dazu wird die Bauteilfestigkeit der Versuchsproben rechnerisch bestimmt und den experimentellen Ergebnissen gegenübergestellt. Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wird der Sicherheitsfaktor $j_{\text{ges}} = 1$ gesetzt. Außerdem wird, als Eingangsgröße für die Berechnungen, die im Versuch bestimmte mittlere Zugfestigkeit R_m genutzt. (In der Praxis wird für die Durchführung eines Festigkeitsnachweises ein Normwert für die Zugfestigkeit genutzt, welcher auf das Bauteil umgerechnet wird. Durch den abgeminderten Normwert für die Zugfestigkeit wird angenommen, dass bei schwingender Beanspruchung eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 97,5 % zutrifft. Alternativ können auch experimentell ermittelte Kennwerte unter Berücksichtigung der Streuung genutzt werden, um die geforderte Überlebenswahrscheinlichkeit zu gewährleisten.) Durch die Nutzung, der im Versuch ermittelten mittleren Zugfestigkeit zur Berechnung der Werkstoff-Wechselfestigkeitsfestigkeit, können die berechneten Festigkeiten mit den für eine Ausfallwahrscheinlichkeit von $P_A = 50\%$ ermittelten experimentellen Festigkeiten abgeglichen werden. Ein vergleichbares Vorgehen wird für die Nachrechnung eines Schadenfalls in der Richtlinie unter Punkt 3.2.1.3 „Bauteil-Istwerte“ [FKM 12] vorgeschlagen.

4 Experimentelle Untersuchungen

Die Basis für die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit bilden neben Literaturdaten eigene umfangreiche experimentelle Untersuchungen. Der Schwerpunkt der Experimente liegt dabei auf der Untersuchung der Schwingfestigkeit, aber auch grundlegende Werkstoffkennwerte werden z.B. im Zugversuch ermittelt.

4.1 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm ist in Tabelle 4.1 dargestellt. Untersucht werden die beiden Werkstoffen: GJS 800-8 (ADI) und GJS 1400-1 (ADI). Der Werkstoff GJS 800-8 (ADI) stellt mit einer Zugfestigkeit von $R_m = 800 \text{ MPa}$ bei einer Bruchdehnung von $A = 8 \%$ einen niedrigfesten ADI-Werkstoff mit hoher Dehnbarkeit dar. Der zweite untersuchte Werkstoff, GJS 1400-1 (ADI), ist mit einer Zugfestigkeit von $R_m = 1400 \text{ MPa}$ hochfest. Er weist eine geringere Bruchdehnung von $A = 1 \%$ auf.

Die Werkstoffcharakterisierung und Untersuchung der Werkstoffqualität erfolgt auf Basis von Zug- und Schlagbiegeversuchen sowie Schliffbildern.

Das durchgeführte Versuchsprogramm ist in Tabelle 4.1 dargestellt. Den Hauptanteil der Untersuchungen bilden spannungsgeregelte Flachbiege- sowie Torsionsversuche. Es werden für die Spannungsverhältnisse $R = -1$ (wechselnde Belastung) und $R = 0$ (schwellende Belastung) Wöhlerlinien für den Zeit- und Langzeitfestigkeitsbereich aufgenommen. Aus diesen Spannungsverhältnissen kann die Mittelspannungsempfindlichkeit nach [FKM 12] bestimmt werden. Zusätzlich erfolgen exemplarische Untersuchungen bei hohen Mittelspannungen bei einem Spannungsverhältnis $R = 0,5$. Zur Bestimmung des Einflusses des statistischen Größeneinflusses werden exemplarisch Umlaufbiegeversuche durchgeführt. In Axialversuchen werden die Langzeitfestigkeit für das Spannungsverhältnis $R = -1$ bestimmt sowie dehnungsgeregelte Versuche durchgeführt.

Der Einfluss von Phasenverschiebung bei mehrachsigen Beanspruchungen wird exemplarisch auf einem Tension-Torsion-Prüfstand untersucht. Diese Untersuchung soll einen ersten Anhaltspunkt für das Verhalten des Werkstoffs unter mehrachsiger Belastung liefern.

Tabelle 4.1: Versuchsprogramm

		GJS 800-8 (ADI)			GJS 1400-1(ADI)		
Werkstoffcharakterisierung							
		<ul style="list-style-type: none">• Zugversuche• Schlagbiegeversuche• Schliffbilder					
Schwingversuche							
Spannungsgeregelte Versuche							
		R = -1	R = 0	R = 0,5	R = -1	R = 0	R = 0,5
	Flachbiegung	Z+LZ	Z+LZ	Z	Z+LZ	Z+LZ	Z
	Torsion	Z+LZ	Z+LZ	LZ	Z+LZ	Z+LZ	Z
	Zug/Druck	LZ			LZ		
	Umlaufbiegung	LZ					
Dehnungsgeregelte Versuche							
		<ul style="list-style-type: none">• Zug/Druck• Spannungsverhältnis: R = -1					
Mehraxiale Versuche							
		<ul style="list-style-type: none">• Zug/Druck und Torsion• Spannungsverhältnis: R = -1• Phasenverschiebung: $\delta = 0^\circ$; $\delta = 90^\circ$					

Z: Versuche im Zeitfestigkeitsbereich

LZ: Versuche im Langzeitfestigkeitsbereich

4.2 Werkstoffcharakterisierung

Für die Untersuchungen werden Y-Proben vom Typ IV [DIN 1564] mit einer Nennlänge von 200 mm bei der Eisengießerei Hulvershorn gefertigt, Abbildung 4.1. Die Fertigung der Proben erfolgt für den Werkstoff GJS 800-8 in 6 Chargen und für den Werkstoff GJS 1400-1 in 2 Chargen. Die jeweilige chemische Zusammensetzung können den Prüfzeugnissen im Anhang 9.5 entnommen werden.

Die Wärmebehandlung erfolgt nur für den unteren Prüfbereich der Probe. Der obere Teil wird zuvor abgetrennt. Auf diesen Weg wird der Querschnitt verringert und die Wärmeführung verbessert.

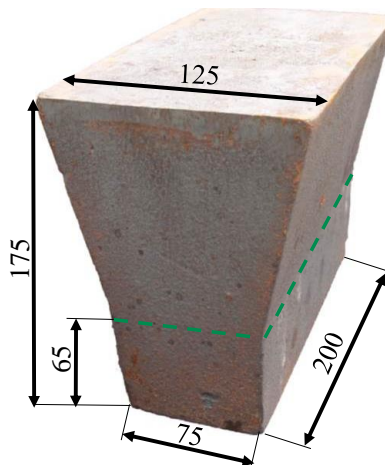


Abbildung 4.1: Gussprobe; Y-Probe Typ IV [DIN 1564]

4.2.1 Zugversuche

Die Zugversuche werden nach [DIN EN ISO 6892-1] durchgeführt. Es werden für beide Werkstoffe aus je drei Gussproben je neun Versuchsproben DIN 50125-A8x40 [DIN 50125] entnommen. Für den Werkstoff GJS 800-8 (ADI) werden die Proben je aus einem Gussrohling der Chargen CH1, CH3 und CH5 entnommen. Für den Werkstoff GJS 1400-1 (ADI) stammen die Proben aus einem Gussrohling der Charge CH1 und aus zwei Rohlingen der CH2. Die Entnahme der Proben erfolgt nach dem in Abbildung 4.2 dargestellten Schema. Auf diese Weise wird der Bereich der Gussproben, der später für die Schwingproben genutzt wird, abgedeckt. Durch die Nummerierung der Proben ist eine Nachverfolgbarkeit der Entnahmepositionen gewährleistet.

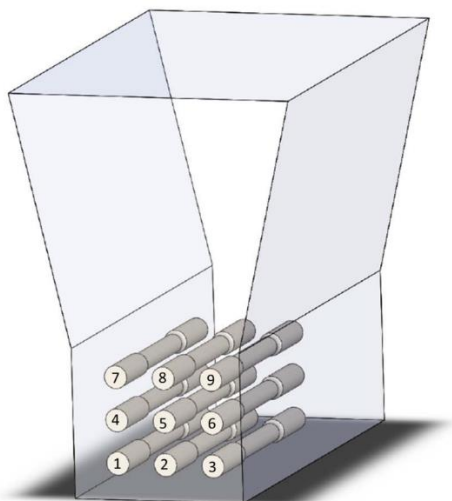


Abbildung 4.2: Probenentnahme: Zugproben

Für die untersuchten Werkstoffe ergeben sich die in Tabelle 4.2 dargestellten Kennwerte. Die aufgeführten Werte entsprechen den Mittelwerten für die Werkstoffe. Zusätzlich sind die Standardabweichungen gegeben. Im Mittel werden die geforderten Zugfestigkeiten von 800 MPa bzw. 1400 MPa sowie die Bruchdehnungen von 8 % bzw. 1 % erreicht.

Tabelle 4.2: Ergebnisse aus dem Zugversuch

	GJS 800-8 (ADI)	GJS 1400-1 (ADI)
Zugfestigkeit R_m :	892 MPa	1466 MPa
Standardabweichung:	31 MPa	60 MPa
Ersatzstreckgrenze $R_{p0,2}$:	621 MPa	1133 MPa
Standardabweichung:	8 MPa	29 MPa
Bruchdehnung $A_{5,65}$:	8,23 %	2,24 %
Standardabweichung:	1,81 %	0,87 %
Elastizitätsmodul E:	164 GPa	154 GPa
Standardabweichung:	9 GPa	4 GPa

In Abbildung 4.3 sind die erreichten mittleren Zugfestigkeiten sowie Bruchdehnungen nach Entnahme Positionen aus der Y-Probe dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass die Festigkeit und auch die Dehnbarkeit abhängig vom Entnahmeort nach oben hin abnehmen. Damit nehmen die Kennwerte mit steigender Größe der Graphitkugeln ab, vgl. Abschnitt 4.2.3. In den Bereichen, die für die

Entnahme der Schwingproben vorgesehen sind, liegen die ermittelten Kennwerte jedoch über den Vorgabewerten nach [DIN 1564]. Hierbei ist zu beachten, dass die vorliegenden Y-Proben eine Wanddicke von 75 mm aufweisen.

R_m in MPa	882	862	R_m in MPa	1449	1401
$A_{5,65}$ in %	6,92	7,71	$A_{5,65}$ in %	1,71	1,15
R_m in MPa	894	874	R_m in MPa	1503	1386
$A_{5,65}$ in %	8,11	8,02	$A_{5,65}$ in %	2,73	1,33
R_m in MPa	923	894	R_m in MPa	1504	1494
$A_{5,65}$ in %	9,88	8,51	$A_{5,65}$ in %	3,04	2,71

Abbildung 4.3: Ergebnisse der Zugversuche nach Entnahmepositionen.
links: GJS 800-8; rechts: GJS 1400-1

4.2.2 Schlagbiegeversuche

Es werden Kerbschlagbiegeversuche nach [DIN EN ISO 148-1] an Proben mit V-Kerb sowie Schlagbiegeversuche an ungekerbten Proben durchgeführt. Die Versuchsdurchführung für die ungekerbten Proben wird dabei auch an die [DIN EN ISO 148-1] angelehnt. Für die Versuchsdurchführung wird ein Schlagwerk mit einer maximalen Schlagenergie von 300 J verwendet. Der Radius der Hammerfinne beträgt 8 mm. Die gemessenen Schlagenergien erreichen die in [DIN EN 1564] vorgegebenen Mindestwerte, Tabelle 4.3.

Tabelle 4.3: Ergebnisse Schlagversuche

Werkstoff ◦ Probengeometrie	Verbrauchte Schlagenergie	Standard- abweichung	Mindestwerte der Schlagenergie nach [DIN EN 1564]
GJS 800-8 (ADI) ◦ Charpy-Probe (V-Kerb) ◦ Ungekerbte Probe	10,9 J 140,0 J	0,3 J 8,9 J	110 J*
GJS 1400-1 (ADI) ◦ Charpy-Probe (V-Kerb) ◦ Ungekerbte Probe	6,7 J 70,9 J	0,3 J 6,7 J	35 J

*Wert für GJS 800-10, da GJS 800-8 nicht gegeben

4.2.3 Gefüge-Untersuchung

Zur Überprüfung des Gefüges der untersuchten Werkstoffe werden Schliffbilder angefertigt. Dazu werden aus den Prüfbereich der Y-Proben jeweils zwei quadratische Proben entnommen. Die zunächst aus jeweils drei Gussrohlingen entnommenen Proben zeigen einheitliche Gefüge, weshalb sich die weiteren Untersuchungen auf jeweils einen Gussrohling pro Werkstoff beschränken. Untersucht werden hier jeweils der Randbereich sowie mittlere Bereiche in insgesamt sechs Untersuchungsbereichen, Abbildung 4.4. Jeder Untersuchungsbereich hat eine Probenfläche von $14,85 \text{ mm}^2$ und ist in 10 Messfelder aufgeteilt. Die Zuordnung der Schliffbilder zu den jeweiligen Positionen im Gussrohling kann Abbildung 4.4 entnommen werden.

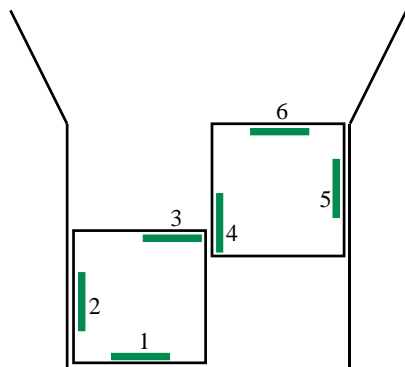


Abbildung 4.4: Anordnung der Untersuchungsbereiche für die Gefügeuntersuchungen der Gussrohlinge

Die Schliffbilder der nicht geätzten Proben, Abbildung 4.5, zeigen die Größe, Form und Anzahl der Graphitkugeln im Gefüge. Die bestimmte Nodularität, der Phasenanteil des Graphits sowie die Graphitausscheidungsichte können aus Tabelle 4.4 und Tabelle 4.5 entnommen werden. Die Auswertung erfolgt nach [EN ISO 945]. Die Graphitausscheidungsichte ist im unteren Probenbereich höher, wobei der Phasenanteil des Graphits über den Probenquerschnitt nahezu konstant bleibt. Der Vergleich der Graphitausprägung zwischen den beiden Werkstoffen zeigt keine auffälligen Unterschiede. Kleinere Lunker sind in den Proben beider Werkstoffe zu finden. Insgesamt sind die Gussqualitäten vergleichbar. Auffällig ist die geringe Graphitausscheidungsichte im Untersuchungsbereich 5 bei beiden untersuchten Werkstoffen. Im Rahmen der Arbeit konnte hierfür keine Erklärung gefunden werden. Eine Verdrehung der oberen Probe im Labor oder bei der Entnahme kann im Nachhinein nicht zweifelsfrei ausgeschlossen werden.

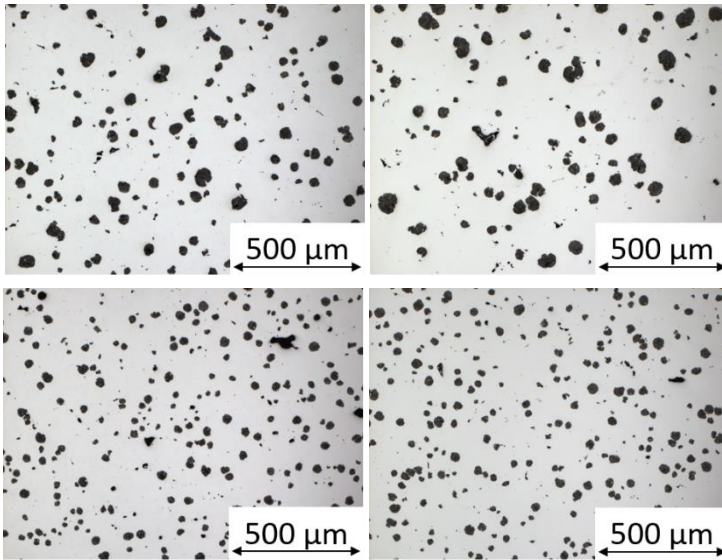


Abbildung 4.5: Schliffbilder nicht geätzt: links oben: GJS 800-8 Untersuchungsbereich 6; links unten: GJS 800-8 Untersuchungsbereich 1; rechts oben: GJS 1400-1 Untersuchungsbereich 6; rechts unten: GJS 1400-1 Untersuchungsbereich 1

Tabelle 4.4: Gussanalyse GJS 800-8 (Charge 3)

Untersuchungsbereich:	1	2	3	4	5	6
Nodularitätskennzahl in %:	87,0	88,9	85,7	81,3	85,5	84,0
Phasenanteil Graphit in %:	8,64	9,03	8,69	8,03	8,79	8,85
Partikelanzahl absolut:	2229	1714	1511	1734	954	1260
Graphitausscheidungsichte in 1/mm ² :	150	115	102	117	64	84,8

Tabelle 4.5: Gussanalyse GJS 1400-1 (Charge 2)

Untersuchungsbereich:	1	2	3	4	5	6
Nodularitätskennzahl in %:	87,3	88,2	87,0	84,4	88,6	85,3
Phasenanteil Graphit in %:	9,12	9,15	8,78	8,47	9,19	9,24
Partikelanzahl absolut:	2507	2074	1559	2263	961	1204
Graphitausscheidungsichte in 1/mm ² :	169	140	105	152	65	81

Zur genaueren Untersuchung der vorliegenden Gefüge werden Klemm-Ätzungen, Abbildung 4.5, und Nital-Ätzungen, Abbildung 4.6, durchgeführt. Sie zeigen jeweils ein gleichbleibendes, nadeliges Gefüge über den gesamten Probenquerschnitt. Das Gefüge des härtesten Werkstoff GJS 1400 ist dabei deutlich feiner ausgeprägt.

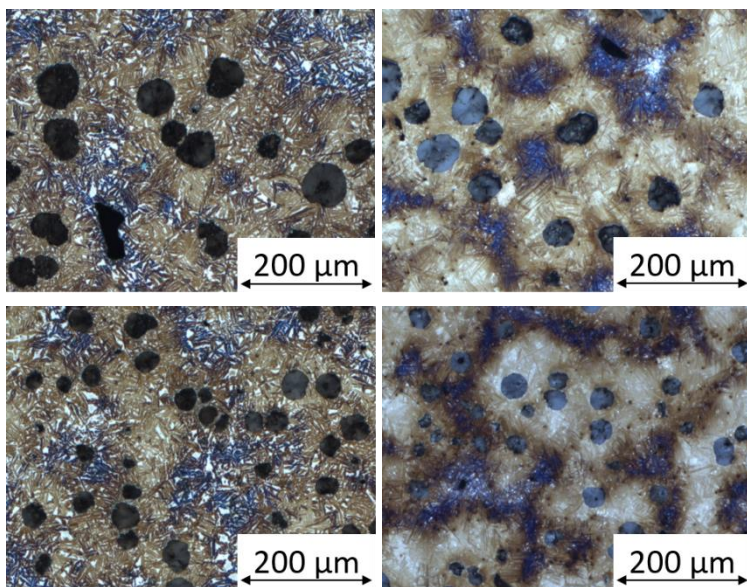


Abbildung 4.6: Schliffbilder klemmgeätzt: links oben: GJS 800-8 Untersuchungsbereich 5; links unten: GJS 800-8 Untersuchungsbereich 2; rechts oben: GJS 1400-1 Untersuchungsbereich 5; rechts unten: GJS 1400-1 Untersuchungsbereich 2

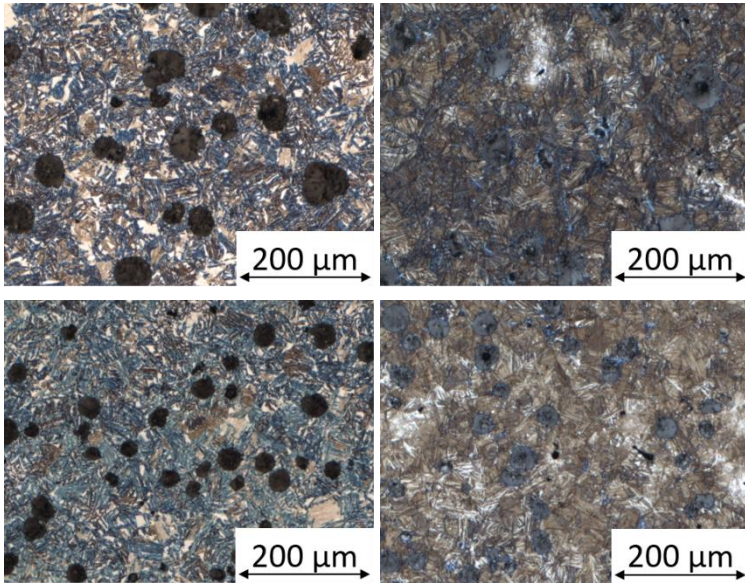


Abbildung 4.7: Schliffbilder nitalgeätzt: links oben: GJS 800-8 Untersuchungsbereich 5; links unten: GJS 800-8 Untersuchungsbereich 2; rechts oben: GJS 1400-1 Untersuchungsbereich 5; rechts unten: GJS 1400-1 Untersuchungsbereich 2

GJS 800-8 wird im Vergleich zum GJS 1400-1 bei höheren Temperaturen ausgelagert. Bei den höheren Temperaturen ist die Kohlenstoffdiffusion im Austenit höher, wodurch sich deutlich größerer Ferrit bildet. In Abbildung 4.8 ist links ein Schliff des untersuchten GJS 800-8 dargestellt. Sein Erscheinungsbild ähnelt der bei 300 °C ausgelagerten ADI-Mikrostruktur aus [Saal 16], rechts. Der Ferrit erscheint hier dunkel und der Austenit hell.

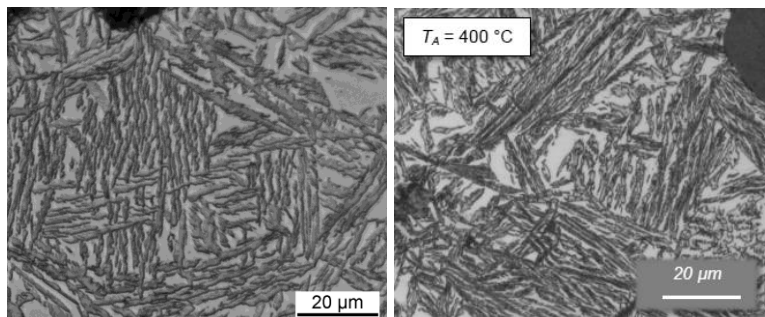


Abbildung 4.8: Gefüge Abgleich GJS 800-8; links: GJS 800-8, geätzt (Nital); rechts: ADI-Mikrostruktur bei einer Ausferritisierungstemperatur von 400°C [Saal 16]

GJS 1400-1 wird bei deutlich geringeren Temperaturen ausgelagert. Bei den niedrigeren Temperaturen ist die Kohlenstoffdiffusion geringer, was zu feineren Ferritplatten führt, [Hass 08]. In Abbildung 4.9 links ist das Gefüge des GJS 1400-1 dargestellt. Es ähnelt mit seiner deutlich feineren Struktur dem bei 300°C ausgelagertem ADI aus [Saal 16], rechts. Damit zeigen die Gefüge der untersuchten Werkstoffe die erwünschten Ausprägungen. Eine eindeutige Identifizierung der Gefüge ist jedoch aufgrund der optisch sehr ähnlichen Struktur von Martensit und auch von Carbiden nicht möglich. Die mechanischen Eigenschaften, vgl. Abschnitt 4.2.1, sprechen jedoch für das Vorliegen eines ausferritischen Gefüges.

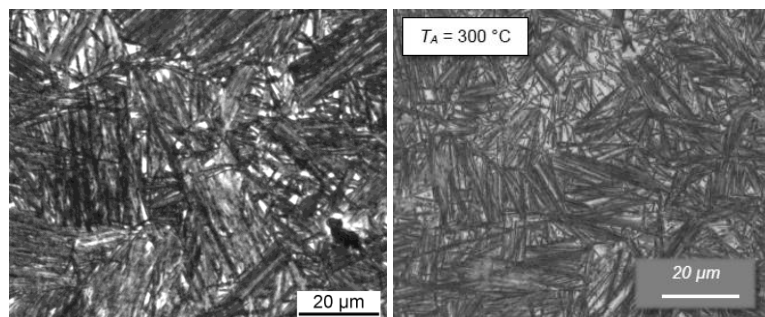


Abbildung 4.9: Gefüge Abgleich GJS 1400-1; links: GJS 1400-1, geätzt (Nital); rechts: ADI-Mikrostruktur bei einer Ausferritisierungstemperatur von 300°C [Saal 16]

4.3 Versuchsaufbau und Durchführung

4.3.1 Genutzte Versuchsproben

Die für die Schwingfestigkeitsuntersuchungen verwendeten Proben werden nach dem in Abbildung 4.10 dargestellten Schema aus den Gussrohlingen der beiden Werkstoffe entnommen. Die Entnahmepositionen befinden sich im unteren Randbereich, um möglichst fehlerstellenfreie Versuchsproben zu bekommen. Für die unterschiedlichen Versuche werden die in Tabelle 4.6 aufgeführten Gusschargen genutzt.

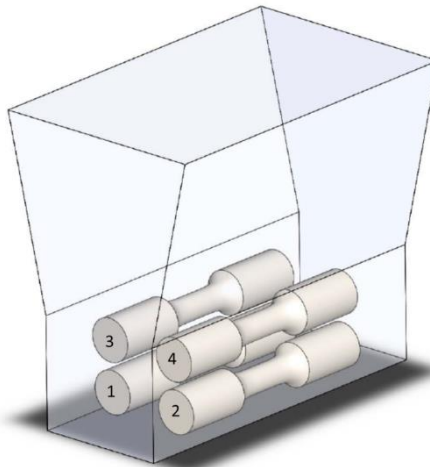


Abbildung 4.10: Entnahmepositionen der Versuchsproben aus den Gussrohlingen

Tabelle 4.6: Für die Versuche genutzte Werkstoffchargen

Belastungsart	Spannungsverhältnis	Verwendete Charge	
		GJS 800-8	GJS 1400-1
Flachbiegung	$R = -1$	Ch1	Ch2
	$R = 0$	Ch2	Ch2
	$R = 0,5$	Ch4	Ch2
Torsion	$R = -1$	Ch3	Ch1
	$R = 0$	Ch4	Ch1
	$R = 0,5$	Ch1; Ch2; Ch4; Ch5	Ch1
Umlaufbiegung	$R = -1$	Ch5	-
Mehrachsrig	$R = -1$	Ch5	-

Für die Schwingversuche werden ungekerbte Rundproben verwendet. Die Probengeometrie entspricht dabei einer geometrischen Vergrößerung der Probe 13 nach [FKM 198]. Diese Probengeometrie ist mit Hilfe von CAO so gestaltet, dass die Formzahl nahezu $K_t = 1$ entspricht, Abbildung 4.11. Der Nenndurchmesser liegt hier bei 14 mm. Die Einspannbereiche sind jeweils an die entsprechenden Prüfstände angepasst. Für die Flachbiegung ist der Einspannquerschnitt rund und hat einen Durchmesser von 25 mm. Die Einspanngeometrie der Torsionsprobe besitzt einen quadratischen Querschnitt, um ein Durchrutschen zu verhindern. Für die Umlaufbiege- sowie die mehrachsigen Versuche werden ebenfalls Proben mit derselben Prüfgeometrie und angepassten Einspannbereichen verwendet, Abbildung 4.12.

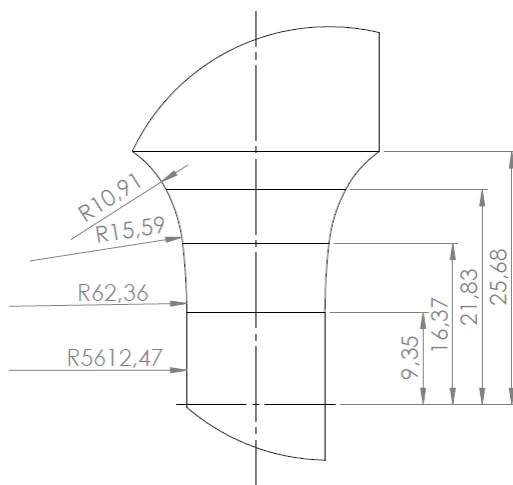


Abbildung 4.11: Probengeometrie im Prüfbereich

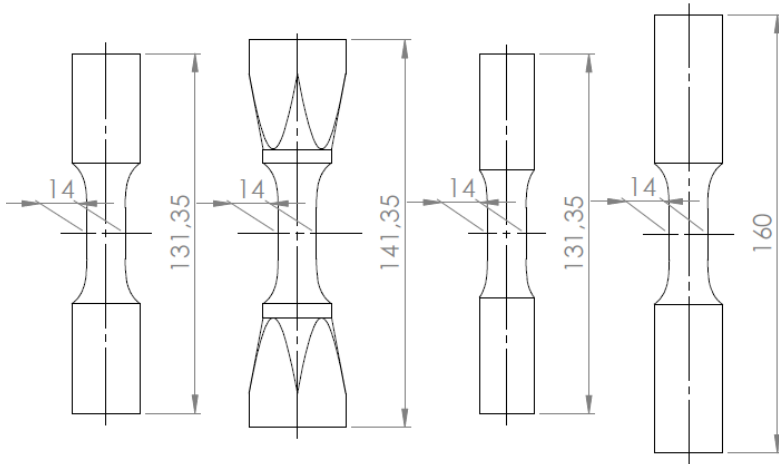


Abbildung 4.12: Verwendete Probengeometrie: von links nach rechts: Flachbiegeprobe; Torsionsprobe; Umlaufbiegeprobe; Probe für mehrachsige Versuche

Für die Axialversuche wird eine geometrisch verkleinerte Probe mit einem Nenndurchmesser von 4 mm verwendet, Abbildung 4.13. Die Probenentnahme erfolgt hier wie bei den Zugversuchsproben nach Abbildung 4.2.

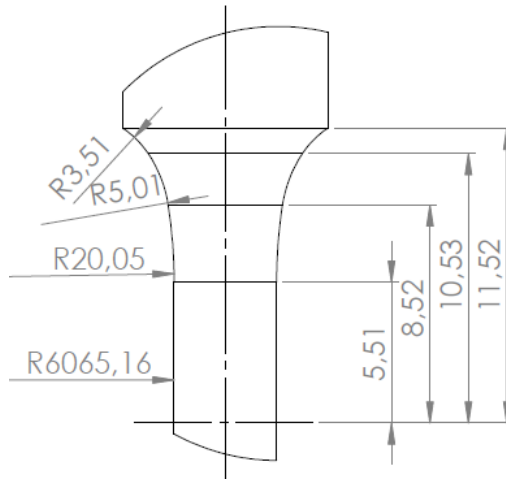


Abbildung 4.13: Probengeometrie der Zugdruckprobe im Prüfbereich

4.3.2 Versuchsaufbau

Die Flachbiege- sowie die Torsionsversuche werden auf unwuchterregten Resonanzprüfständen durchgeführt. Zur Reduktion der Versuchszeit werden zwei, vom Aufbau sehr ähnliche, Prüfstände mit einer maximalen Oberlast von 20 kN verwendet. Für die Prüfung unter Flachbiege- bzw. Torsionsbelastungen werden Prüfvorrichtungen konstruiert, die eine spielfreie Einleitung der Kräfte in die Versuchsproben ermöglichen. Die Kraftübertragung erfolgt mit Hilfe von Lenkerblechen. In Abbildung 4.14 links ist der 4-Punkt-Flachbiegeprüfstand dargestellt. Die Krafteinleitung erfolgt von unten in die Biegevorrichtung. Oben, am unbewegtem Teil des Prüfaufbaus, wird die Kraft gemessen. Die Versuchsprobe wird kraftschlüssig in der Mitte der Vorrichtung geklemmt. Um ein Ausknicken des Prüfaufbaus im Druckbereich zu vermeiden sind Knickstützen angebracht. Die Prüffrequenz liegt abhängig von der Prüfkraft bei ca. 30 Hz. Der Torsionsprüfstand ist ähnlich aufgebaut, jedoch wird durch die seitliche Anordnung der Hebelarme ein Torsionsmoment auf die Probe aufgebracht. Die Prüffrequenz liegt hier bei ca. 20 Hz.

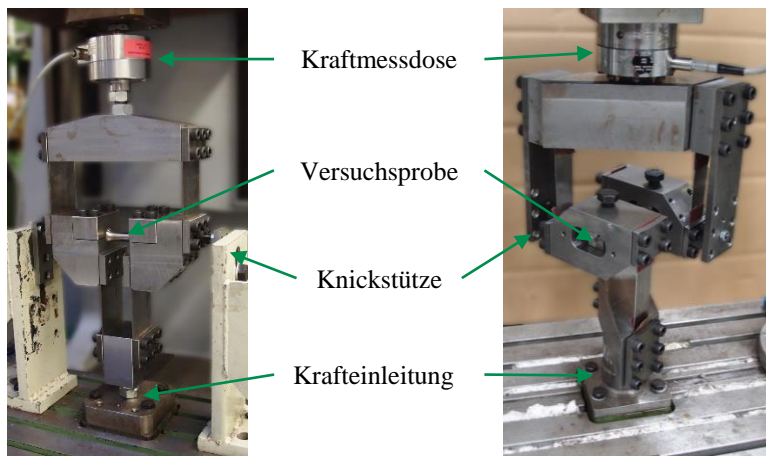


Abbildung 4.14: Prüfaufbau für die Schwingfestigkeitsversuche. links: Flachbiegeprüfstand; rechts: Torsionsprüfstand

Zur Kalibrierung der Prüfstände werden mit DMS beklebte Versuchsproben genutzt. Im Fall der Biegung wird eine Biegebrücke und im Fall der Torsion eine Torsionsbrücke sowie eine Biegebrücke appliziert. Die Kalibrierung der DMS-Proben erfolgt per Shuntkalibrierung sowie durch die Aufbringung bekannter

Momente. Hierzu werden bekannte Kräfte über definierte Hebelarm­längen einge­leitet. Zur anschließenden Kalibrierung der Prüfstände werden die DMS-Proben in die Prüfstände verbaut und mit schrittweise erhöhten statischen und dynamischen Lasten beaufschlagt.

Der Vergleich zwischen rechnerischen, aus den Prüfstandskräften ermittelten, Spannungen und den mit auf Basis der DMS berechneten Spannungen zeigt, ein lineares Übertragungsverhalten. Im Fall der Flachbiegung ist die an der Probe anliegende Spannung jedoch um 5 % geringer als rechnerisch aus den Daten des Prüfstands bestimmt, Abbildung 4.15. Dies ist auf Verluste durch die notwendige Umformung der Lenkerbleche zurückzuführen. Die Abweichung wird in der Versuchsdurchführung rechnerisch berücksichtigt. Beim Torsionsprüfstand stimmen die rechnerischen und die gemessenen Spannungen überein, Abbildung 4.16. Dies ist auf die biegeweicheren Lenkerbleche sowie deren Anordnung zurückzuführen. Neben den Torsionsspannungen werden im Fall der Torsionsprobe auch Biegespannungen erfasst. Auf diesem Weg sollen zusätzliche Biegebeanspruchungen der Probe ausgeschlossen werden. Die gemessenen Biegespannungen liegen unterhalb von 5 % der Torsionsspannungen und können somit vernachlässigt werden.

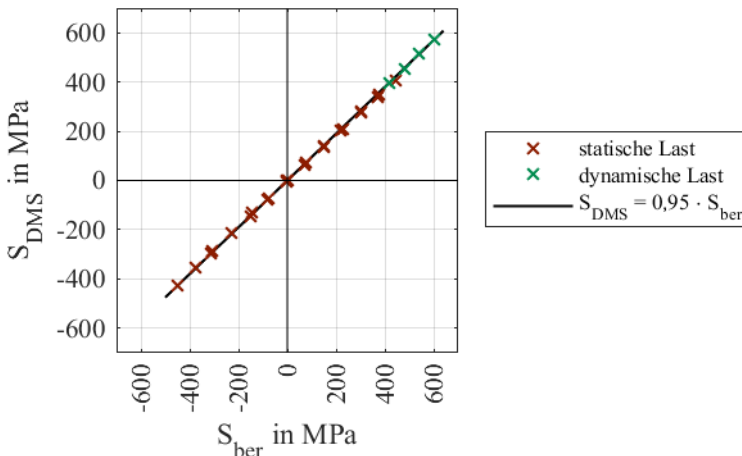


Abbildung 4.15: Kalibrierung der Biegevorrichtung. Gegenüberstellung von rechnerischer und gemessener Biegespannung

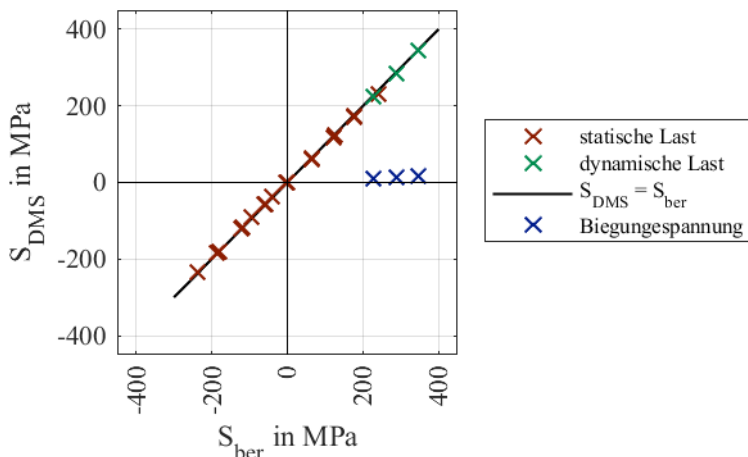


Abbildung 4.16: Kalibrierung der Torsionsvorrichtung. Gegenüberstellung von rechnerischer und gemessener Torsionsspannung

Die Umlaufbiegeversuche werden an einem 4-Punkt-Umlaufbiegeprüfstand durchgeführt. Die Kalibrierung erfolgt hier ebenfalls mit Hilfe einer mit DMS beklebten Versuchsprobe. Das statische Biegemoment bei Stillstand des Prüfstands entspricht der Spannungsamplitude im Betrieb, Abbildung 4.17. Die Prüffrequenz liegt bei 30 Hz.

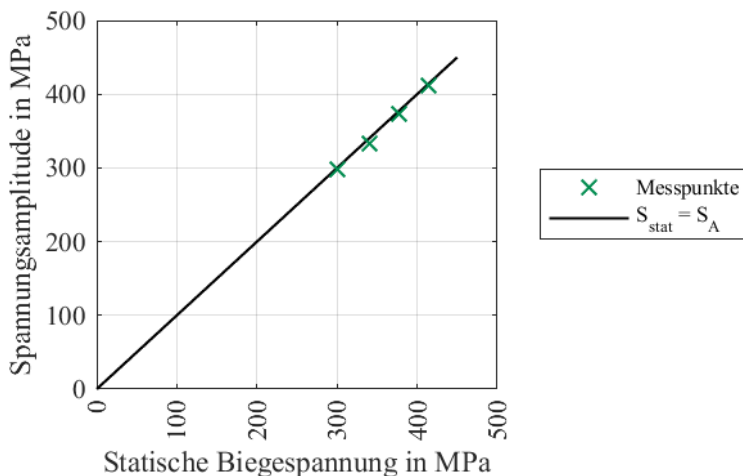


Abbildung 4.17: dynamische Kalibrierung der Umlaufbiegung

Für die spannungsgeregelten Zugdruckversuche wird ein elektromagnetisch angeregter Resonanzprüfstand genutzt. Hier werden Prüffrequenzen von ca. 110 Hz erreicht. Die Versuchsdurchführung und Auswertung der spannungsgeregelten Versuche erfolgt nach [DIN 50100].

Die dehnungsgeregelten Versuche werden an einem servohydraulischen Prüfstand, mit einer maximalen Nennlast von 63 kN, durchgeführt. Zur Messung der Dehnung wird ein Dehnungsaufnehmer mit einem Schneidenabstand von 10 mm verwendet. Die Versuchsdurchführung ist dabei an [SEP 1240], die eigentlich für Feinbleche gültig ist, angelehnt.

4.4 Ergebnisse Schwingversuche

4.4.1 Spannungsgeregelte Versuche

In Tabelle 4.7 sind die Ergebnisse der spannungsgeregelten Wöhlerversuche dargestellt. Die Einzelversuchsergebnisse sowie die Darstellung der einzelnen Wöhlerlinien befinden sich im Anhang 9.4. Im Folgenden werden einzelne Wöhlerlinien miteinander verglichen, um Besonderheiten und Charakteristika zu untersuchen.

Tabelle 4.7: Ergebnisübersicht der spannungsgeregelten Wöhlerversuche

Werkstoff	Spannungs- verhältnis	Wöhlerlinien- neigung	Festigkeit bei $N_B = 10^5$	Langzeit- festigkeit
Belastungsart	R	k	$S_{A,10^5}$	$S_{AD,10^7}$
GJS 800-8				
Flachbiegung	-1	7,9	570 MPa	417 MPa
	0	7,3	449 MPa	300 MPa
	0,5	4,0	264 MPa	-
Torsion	-1	17,2	434 MPa	355 MPa
	0	12,5	309 MPa	249 MPa
	0,5	-		166 MPa
Zugdruck	-1	-		359 MPa
Umlaufbiegung	-1	-		367 MPa
GJS 1400-1				
Flachbiegung	-1	7,6	558 MPa	389 MPa
	0	7,3	390 MPa	247 MPa
	0,5	5,8	316 MPa	-
Torsion	-1	5,3	487 MPa	334 MPa
	0	5,1	290 MPa	204 MPa
	0,5	4,1	200 MPa	-
Zugdruck	-1	-		327 MPa

4.4.2 Dehnungsgeregelte Versuche

Die dehnungsgeregelten Versuche werden als Einstufenversuche bei einem Dehnungsverhältnis von $R_e = -1$ durchgeführt. Die Versuchsdurchführung ist dabei an das Stahl-Eisen-Prüfblatt 1240 [SEP 1240], das für Feinbleche gültig ist, angelehnt. Geprüft wird auf fünf Dehnungshorizonten. Die Ergebnisse, Versuchsauswertung vgl. Abschnitt 3.1.3 sowie [SEP 1240], sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Der Werkstoff GJS 800-8 wird anhand von 15 Versuchsproben untersucht, vgl. 4.3.1. Die Ergebnisse liegen in Form der

Dehnungswöhlerlinie, Abbildung 4.18, und des zyklischen Spannungs-Dehnungs-Diagramms, Abbildung 4.19, vor.

Die Ergebnisse für den Werkstoff GJS 1400-1 sind in Abbildung 4.20 und Abbildung 4.21 dargestellt. Sie basieren auf 14 Einzelversuchen.

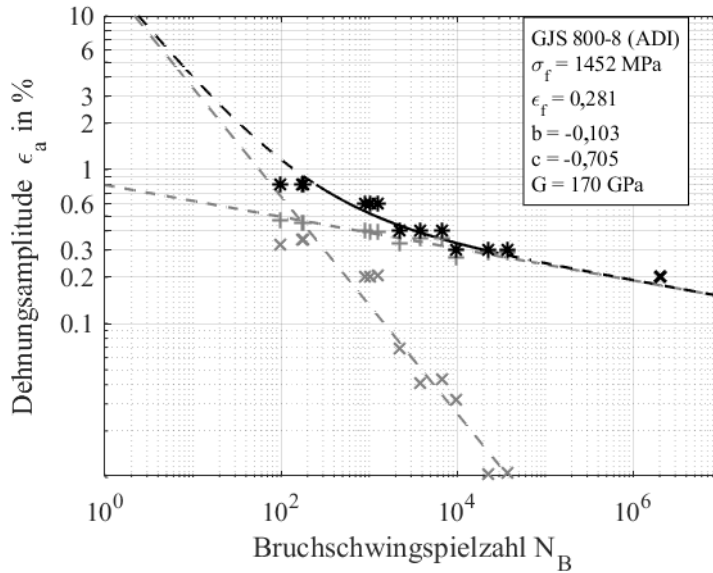


Abbildung 4.18: Dehnungswöhlerlinie für GJS 800-8

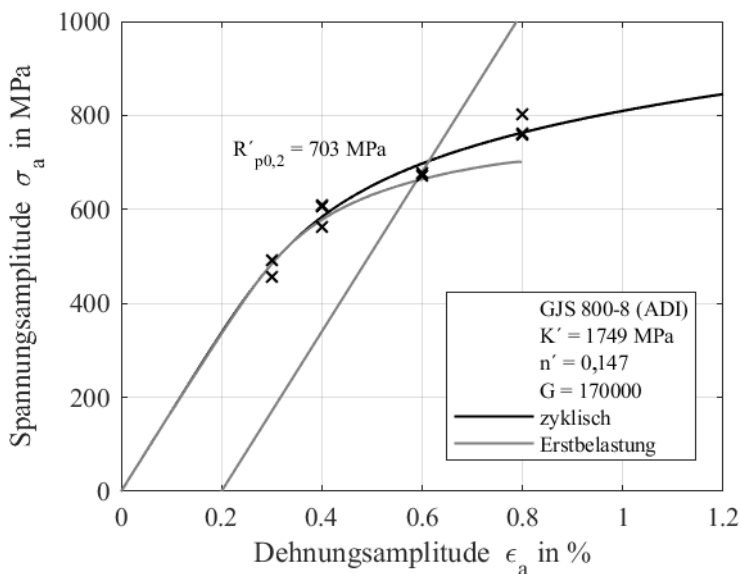


Abbildung 4.19: Zyklisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm für GJS 800-8

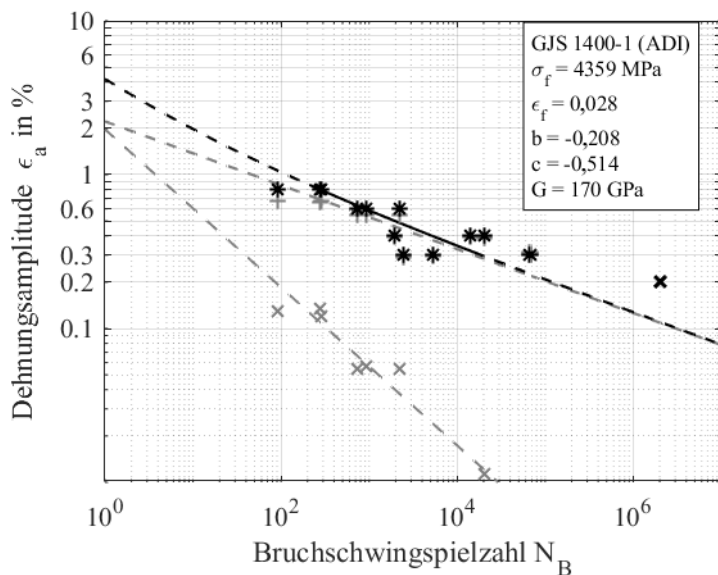


Abbildung 4.20: Dehnungswöhlerlinie für GJS 1400-1

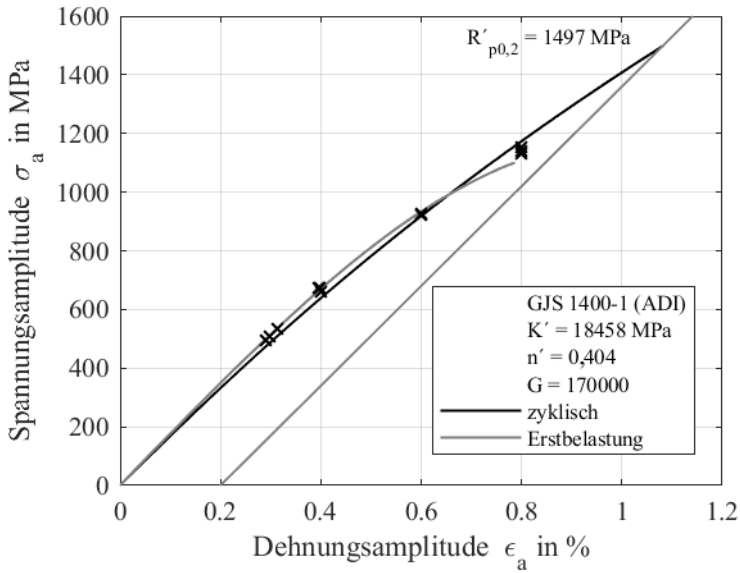


Abbildung 4.21: Zyklisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm für GJS 1400-1

4.4.3 Mehrachsigkeit

Die mehrachsige Beanspruchbarkeit wird hier nur exemplarisch am Werkstoff GJS 800-8 untersucht. Ziel ist es, einen ersten Anhaltspunkt für das Verhalten des Werkstoffs unter mehrachsiger Belastung zu bekommen. Untersucht wird die Überlagerung von Zugdruck- und Torsionsbelastung. Dabei entspricht die maximale Torsionsspannung 80 % der maximalen axialen Spannung.

In Abbildung 4.22 sind die Ergebnisse der mehrachsigen Versuche dargestellt. Als Referenz ist zusätzlich die Wöhlerlinie für die reine Torsionsbelastung gegeben. Es zeigt sich, dass die Phasenverschiebung von 90° zwischen der Axialen- und der Torsionsbelastung zu einer Lebensdauerverlängerung führt. Dieses Ergebnis deckt sich in der Tendenz mit den Ergebnissen an GGG 40 von Neugebauer in [Neug 86].

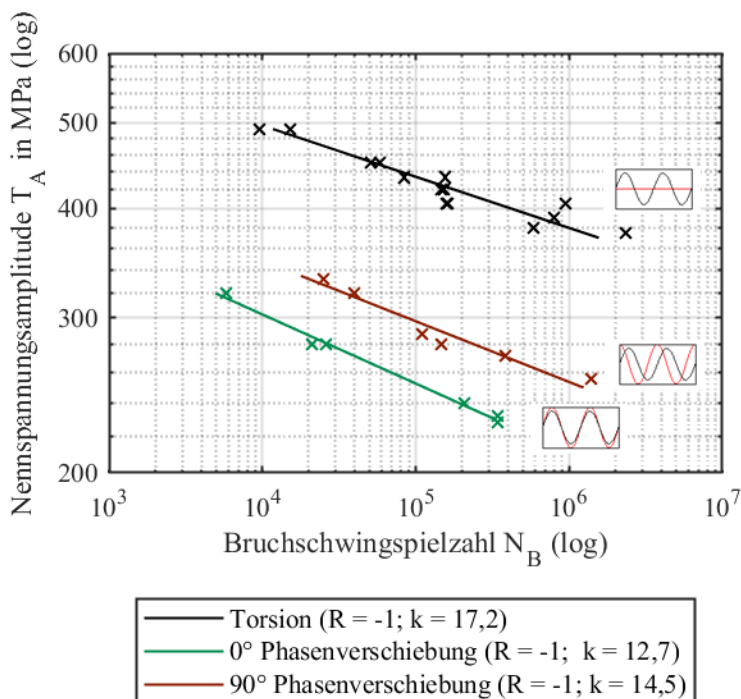


Abbildung 4.22: Gegenüberstellung der Wöhlerlinien der mehrachsigen Versuche für GJS 800-8

4.4.4 Bruchlage

In Abbildung 4.23 sind beispielhaft gebrochene Versuchsproben der Flachbiege- sowie der Torsionsversuche dargestellt. Für beide untersuchten Werkstoffe erfolgt der Schwingbruch, sowohl für die Biege- als auch für die Torsionsbelastung, verformungslos. Das Versagen tritt dabei senkrecht zur maximalen Hauptspannung auf.

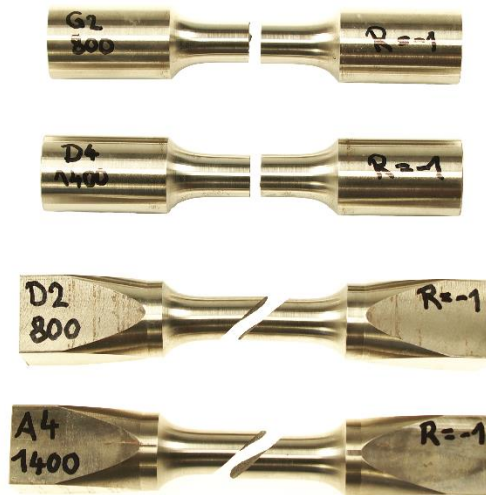


Abbildung 4.23: Gebrochene Versuchsproben

4.5 Diskussion und Abgleich der Ergebnisse der Schwingversuche

Im folgenden Abschnitt wird aufbauend auf den eigenen Versuchsergebnissen sowie Daten aus der Literatur eine erweiterte Betrachtung durchgeführt. Unter anderem wird das Werkstoffverhalten im Zeit- und Langzeitfestigkeitsbereich genauer untersucht.

4.5.1 Wöhlerlinienneigung im Zeitfestigkeitsbereich

Zur betriebsfesten Auslegung von Bauteilen werden neben der Dauer- bzw. Langzeitfestigkeit auch Informationen über den Zeitfestigkeitsbereich benötigt. Hier ist die Wöhlerlinienneigung von besonderer Bedeutung für die Berechnung.

Im Fall der Biegebelastung, die zu Normalspannungen im Bauteil führt, ergibt sich experimentell eine Wöhlerlinienneigung von $k = 7 - 8$, vgl. Abschnitt 4.4. Die Neigung ist dabei zunächst unabhängig vom Werkstoff sowie vom Spannungsverhältnis. Bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0,5$ wird die Neigung tendenziell geringer. Dies ist durch die Nähe der Oberspannung zur Fließgrenze bei hohen Lastenamplituden begründet. Ergebnisse aus der Literatur bestätigen die Wöhlerlinienneigung weitestgehend. In [LEA 11] werden Wöhlerlinienneigungen für ungekerbte ADI-Proben im Bereich von $k = 7 - 10,3$ ermittelt, Abbildung 4.24. Lediglich bei einem Werkstoff, bei dem laut Quelle die Wärmebehandlung fehlerhaft ist, liegt die Neigung bei $k = 3,8$. Die Auswertung von Versuchsdaten aus [Baue 05], [Zapl 08] und [Wohl 10] ergeben ebenfalls Wöhlerlinienneigungen von $k = 7,3 - 8,8$ und bestätigen damit die Erkenntnisse, Abbildung 4.25. Die Auswertung erfolgt hier anhand von, den vorliegenden Diagrammen entnommenen, Einzelversuchsdaten bis maximal $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln. Größere Abweichungen ergeben sich für die Neigung aus den Versuchsdaten von [Wohl 11b]. Hier liegen die Wöhlerlinienneigungen im Bereich von $k = 4,6 - 12,5$. Eine mögliche Erklärung für die größeren Abweichungen bei der Neigung liefern die zum Teil eingeschränkten Untersuchungsbereiche. So konnten z.B. für die Bestimmung der Wöhlerlinienneigung mit dem Wert $k = 4,6$ lediglich sechs Einzel Versuchsergebnisse mit einem maximalen Unterschied der Spannungsamplitude von 25 MPa genutzt werden. Insgesamt ergibt sich damit eine mittlere Wöhlerlinienneigung, für ungekerbte Proben aus ADI unter Normalbeanspruchung, von $k = 8$.

Untersuchungen von Proben mit Gussoberfläche aus [Wohl 11b], [Sons 05] und [Baue 05] zeigen einen steileren Verlauf der Wöhlerlinie mit einer Neigung von ca. $k = 4 - 6$.

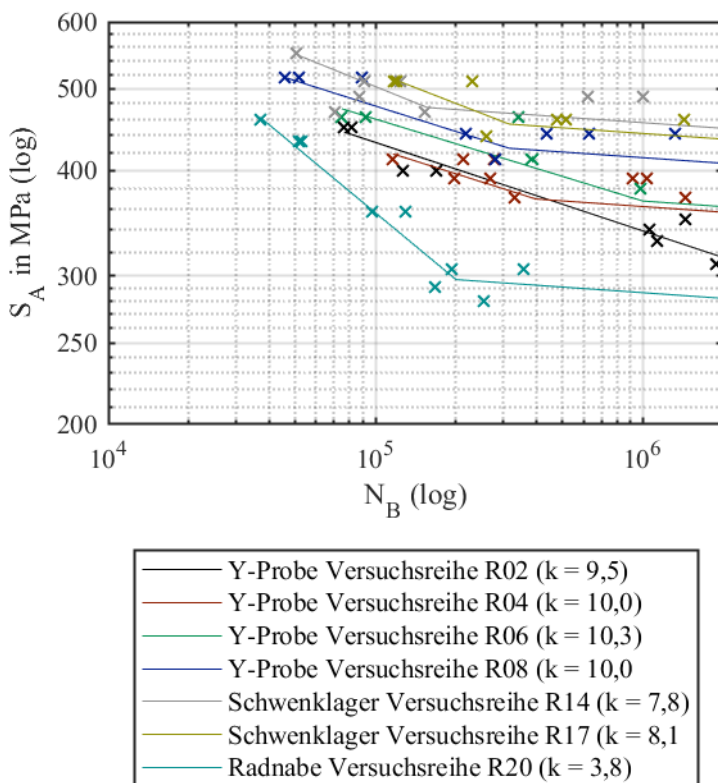


Abbildung 4.24: Wöhlerlinienneigungen aus Zugdruckversuchen [LEA 11]

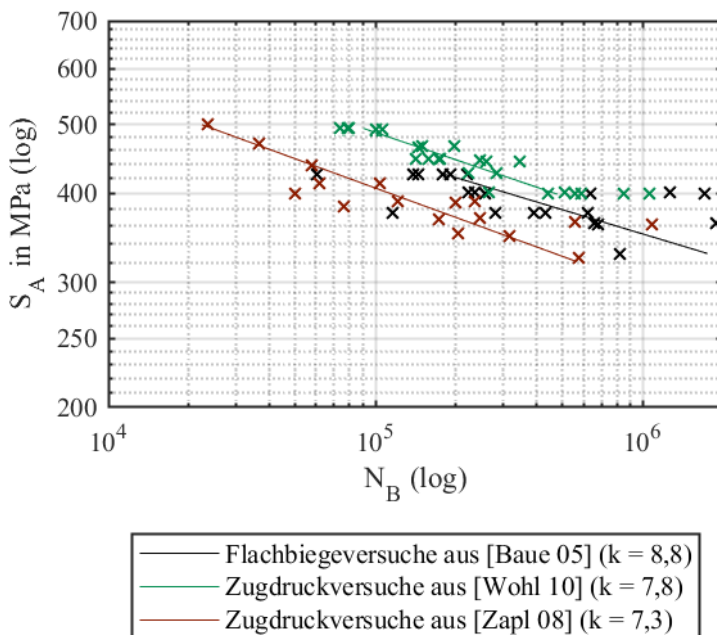


Abbildung 4.25: Wöhlerlinienneigungen aus Literaturwerten, [Baue 05], [Wohl 10] und [Zapl 08]

Die Torsionswöhlerlinien unterscheiden sich im Zeitfestigkeitsbereich deutlich von den unter Normalspannungen ermittelten. Im Fall des GJS 800-8 ergeben sich Wöhlerlinienneigungen von $k = 12,5 - 17,2$, was einem flacheren Verlauf der Wöhlerlinie entspricht. Für den Werkstoff GJS 1400-1 ergeben sich deutlich steilere Verläufe der Wöhlerlinien im Zeitfestigkeitsbereich mit $k = 4,1 - 5,3$. Ein Abgleich mit Ergebnissen aus der Literatur ist aufgrund fehlender Daten nicht möglich.

Neben der Neigung ist die Ecklastschwingspielzahl für die Beschreibung der Wöhlerlinie relevant. Sie ergibt sich für die durchgeführten Biegeversuche zu ca. 10^6 Lastwechseln, wie später noch gezeigt wird, Abbildung 4.32. Bei den durchgeführten Torsionsversuchen liegt sie jedoch bei geringeren Werten von ca. $4 \cdot 10^5$ Lastwechseln. In anderen Quellen werden ebenfalls abweichende Ecklastschwingspielzahlen genannt. In [LEA 11] sind Werte im Bereich von $1,6 \cdot 10^5$ bis $2,5 \cdot 10^6$ gegeben. In [Wohl 10] liegt die Ecklastschwingspielzahl mit ca. $5 \cdot 10^5$ Lastwechseln ebenfalls bei geringeren Werten. [Wohl 11a+b] bestätigen jedoch wiederum eine Ecklastschwingspielzahl von ca. 10^6 Lastwechseln.

4.5.2 Wöhlerlinienneigung im Langzeitfestigkeitsbereich

Die Langzeitfestigkeiten werden für eine Grenzlastschwingspielzahl von 10^7 Lastwechsel bestimmt. Die Versuche zeigen jedoch, dass auch im Bereich kurz vor Erreichen der Grenzlastschwingspielzahl noch Brüche auftreten. Aus diesem Grund werden einzelne Versuche an Axialproben über die Grenzlastschwingspielzahl hinaus weiter geprüft. Es zeigt sich, dass auch hier noch Brüche auftreten, vgl. Anhang 9.4. Damit besitzt der Werkstoff ADI keine ausgeprägte Dauerfestigkeit. Dies deckt sich mit Ergebnissen von Sonsino [Sons 05b], der zeigt, dass insbesondere für Werkstoffe mit kubisch-flächenzentrierter Struktur, keine ausgeprägte Dauerfestigkeit aufweisen. ADI enthält mit Ausferrit auch Austenit, welches eine solche kubisch-flächenzentrierte Struktur aufweist. Somit ist auch hier ein Abfall der Schwingfestigkeit im Bereich jenseits des Abknickpunktes zu erwarten. Für austenitische Stähle und Aluminium wird dies in der FKM-Richtlinie [FKM 12] bereits durch den Wöhlerlinien Typ II berücksichtigt. Diese zeigt im Bereich von 10^6 bis 10^8 Lastwechseln einen weiteren Abfall der Schwingfestigkeit. Für GJS, der in seiner allgemeinen Form nicht wärmebehandelt ist und damit kein Austenit enthält, ist diese Wöhlerlinienform jedoch nach [FKM 12] nicht vorgesehen.

Auf Grund der sich experimentell zeigenden Abnahme der Schwingfestigkeit bei hohen Lastwechselzahlen soll hier die Neigung der Wöhlerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich k^* bestimmt werden. Da die Versuche jedoch im Langzeitfestigkeitsbereich, aufgrund der langen Versuchszeiten, nur bis zu einer Grenzlastschwingspielzahl von $N_G = 10^7$ Lastwechseln gefahren werden können, ist eine Versuchsauswertung, wie sie im Allgemeinen im Zeitfestigkeitsbereich durchgeführt wird, nicht möglich. Dort erfolgt die Ermittlung im Allgemeinen mit einer linearen Regression. Dieses Verfahren ist bei Durchläufern und damit zensierten Daten nicht anwendbar. Verfahren, die die Berechnung der Wöhlerlinienneigung mit zensierten Daten auf Basis eines Maximum-Likelihood-Ansatzes ermöglichen, werden unter anderem in [Spin 79], [Spin 81] und [Stör 15] gezeigt. Die dort genutzten Algorithmen sind dort nicht dokumentiert und stehen damit hier nicht zur Verfügung.

Aus diesem Grund wurde ein Algorithmus entwickelt, der die Ermittlung der Wöhlerlinienneigung auf Basis einer Maximum-Likelihood-Methode ermöglicht. Der im Folgenden gezeigte Algorithmus ist bereits in [Enge 17] veröffentlicht.

Der Algorithmus bestimmt die Wöhlerlinie, für die das Auftreten der im Versuch ermittelten Ergebnisse am wahrscheinlichsten ist. Die Wöhlerlinie wird dabei, wie auch im Zeitfestigkeitsbereich, mit der Gleichung nach Basquin

[Basq 10] definiert, Gleichung (4.1). Sie ist damit abhängig von der Neigung im Langzeitfestigkeitsbereich k^* sowie von einem Stützpunkt $S_{A,sup}$ bei der Schwingspielzahl N_{sup} . Der Algorithmus variiert die Neigung, die Spannungsamplitude am Stützpunkt, sowie zusätzlich die logarithmische Standardabweichung in Schwingspielzahlrichtung so lange, bis er die Parameterkombination gefunden hat, für die die Auftretenswahrscheinlichkeit der Versuchsergebnisse am größten ist, Abbildung 4.26. Die auf diesem Weg ermittelten Parameter beschreiben die Ergebnis-Wöhlerlinie.

$$N = C_{LLF} \cdot S_A^{-k^*} = \frac{N_{sup}}{S_{A,sup}^{-k^*}} \cdot S_A^{-k^*} \quad (4.1)$$

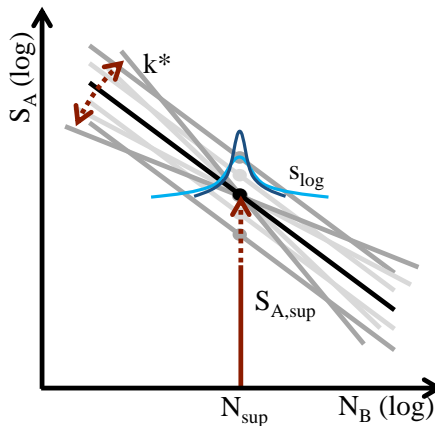


Abbildung 4.26: Schematische Darstellung der Variation der Wöhlerlinienparameter

4.5.2.1 Algorithmus zur Bestimmung der Neigung im Langzeitfestigkeitsbereich

Der Aufbau des Algorithmus ist in Abbildung 4.27 dargestellt. Als Eingangsdaten werden zunächst die Einzelversuchsergebnisse benötigt. Diese bestehen aus der jeweiligen Belastungsamplitude der erreichten Lastwechselzahl sowie der Information, ob es sich um einen Bruch oder Durchläufer handelt. Berechnungsseitig werden Startwerte für die drei Parameter: Neigung der Wöhlerlinie k^* , Spannungsamplitude S_a am Stützpunkt N_{sup} und logarithmische Standardabweichung S_{log} benötigt. Diese können prinzipiell frei gewählt werden, wobei eine günstige, ergebnisnahe Wahl die Rechenzeit verkürzt. Hier wird als Startwert

für die Spannungsamplitude der Mittelwert der Spannungsamplituden der Einzelversuche, und für die Neigung eine geschätzte Neigung von $k^* = 30$ genutzt. Als Streuparameter wird hier die logarithmische Standardabweichung gewählt, da diese für die meisten Anwendungsfälle im Bereich der Betriebsfestigkeit zutrifft, [Müll 15].

Mit dem Algorithmus werden zunächst für die gegebenen Parameter die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der experimentellen Versuchsergebnisse bestimmt. Mit der Neigung und dem Stützpunkt ist die Wöhlerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich definiert und es kann für jeden, in den Versuchsdaten auftretenden Spannungshorizont, die mittlere Schwingspielzahl bestimmt werden. In Verbindung mit der logarithmischen Standardabweichung ist damit die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für das Auftreten eines Bruchs für jeden beliebigen Lasthorizont bekannt. Für die in den Versuchsdaten enthaltenden Brüche wird nun für die entsprechenden Lasthorizonte und Schwingspielzahlen der Wert der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion p_i ermittelt. Im Fall von Durchläufern wird nicht der Wert der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, sondern die Fläche unter dieser ab der entsprechenden Grenzlastschwingspielzahl ermittelt. Diese Fläche entspricht der Wahrscheinlichkeit P_j , dass ein Bruch nach Erreichen dieser Schwingspielzahl eintritt.

Das Produkt der Wahrscheinlichkeitsdichten p_1 bis p_i , im Fall der Brüche, und der Wahrscheinlichkeiten P_1 bis P_i , im Fall der Durchläufer, bildet die Übereinstimmungswahrscheinlichkeit L , Gleichung (4.2), [Geor 15]. Diese entspricht der namensgebenden „Likelihood“ der Maximum-Likelihood-Methode.

$$L = p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_i \cdot P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_j \quad (4.2)$$

Im nächsten Schritt wird einer der Parameter, z.B. die Neigung k^* um einen Faktor erhöht. Für die neue Parameterkombination wird die oben beschriebene Berechnung der Wahrscheinlichkeit L wiederholt. Ist diese Wahrscheinlichkeit größer als die zuvor berechnete, wird der neue Parametersatz übernommen und im nächsten Schritt der nächste Parameter variiert. Ist die Wahrscheinlichkeit L geringer, wird der alte Parametersatz beibehalten und der zuletzt geänderte Parameter im nächsten Schritt in die entgegengesetzte Richtung variiert. Auf diese Weise werden die Parameter so lange angepasst, bis die Wahrscheinlichkeit L ihr Maximum annimmt. Dies ist erreicht, wenn keine Variation eines Parameters mehr zu einer Erhöhung der Wahrscheinlichkeit führt. Die Ergebnisgenauigkeit ist dabei abhängig von der Wahl der Stufensprünge.

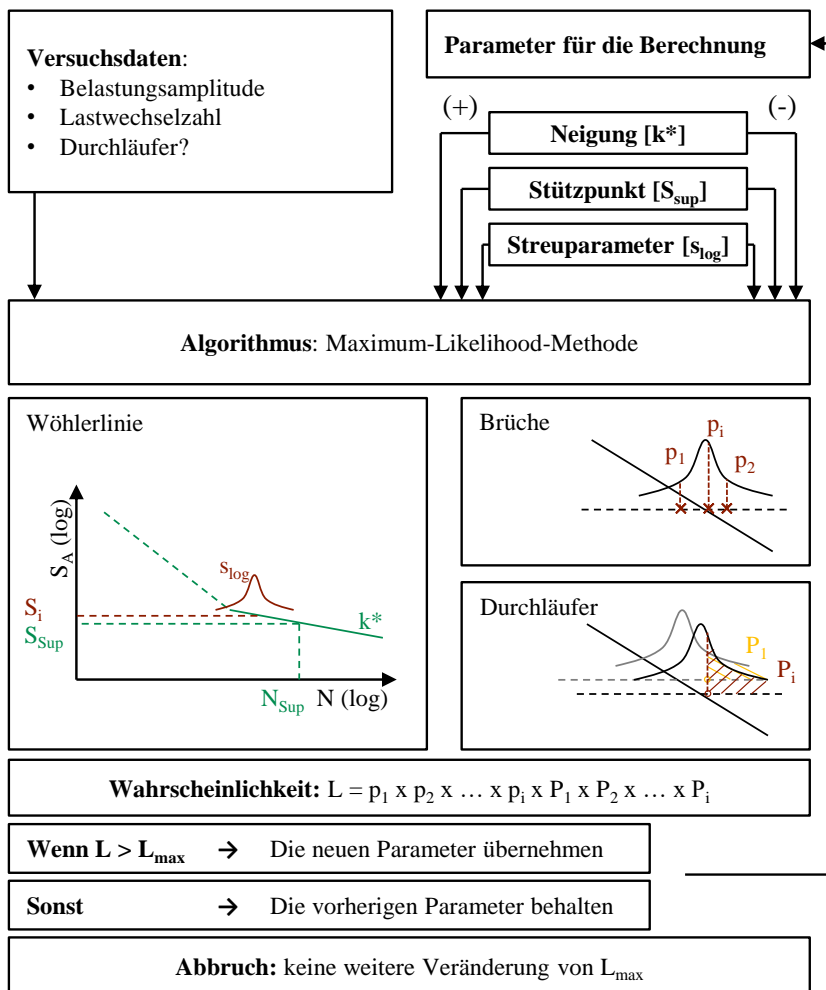


Abbildung 4.27: Algorithmus zur Bestimmung der Neigung der Wöhlerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich

4.5.2.2 Überprüfung des Algorithmus mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen

Um die Funktion und die Ergebnisgüte des vorgestellten Algorithmus zu überprüfen, werden Berechnungen, für mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen generierte Ergebnisse, durchgeführt. Somit können Versuchsergebnisse für eine bekannte Grundgesamtheit generiert werden, die eine Überprüfung der Treffsicherheit und erwartungstreue der Berechnung ermöglichen. Für die Simulation werden zunächst eine Master-Wöhlerlinie sowie eine logarithmische Standardabweichung definiert. Die logarithmische Standardabweichung wird in Schwingungszahlrichtung definiert, da im Versuch die Lastamplitude vorgegeben ist (unabhängige Größe) und die Schwingungszahl variiert (abhängige Größe).

Simuliert werden Langzeitfestigkeitsversuche nach dem Treppenstufenverfahren. Das Treppenstufenverfahren wird gewählt, da Versuchsdaten im Allgemeinen auch als Treppenstufenversuche vorliegen. Die Abbruchschwingungszahl wird z.B. auf 10^7 Lastwechsel festgelegt. Zunächst werden nun der Starthorizont sowie der Stufensprung zufällig, jedoch im üblichen Bereich, festgelegt. Im Anschluss wird, mit Hilfe der definierten Wöhlerlinie, die mittlere Lastwechselzahl für den Spannungshorizont bestimmt, vgl. Abbildung 4.28. Zur Bestimmung der logarithmisch normalverteilten, zufälligen Lastwechselzahl wird nun die Inversionsmethode [Devr 96] genutzt. Hier wird zunächst eine Zufallszahl im Bereich von 0 bis 1 gezogen und diese dann unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeitsfunktion auf die Lastwechselzahl umgerechnet. Die Wahrscheinlichkeitsfunktion ist dabei durch den aus der Wöhlerlinie ermittelten Mittelwert und die logarithmische Standardabweichung definiert. Ist die auf diesem Weg ermittelte Lastwechselzahl kleiner als die vorgegebene Grenzlasterlastschwingungszahl, wird sie als Bruch markiert und der Datensatz abgespeichert. Ist die Lastwechselzahl größer als die Grenzlasterlastschwingungszahl, wird die Lastwechselzahl auf den Wert der Grenzlasterlastschwingungszahl gesetzt und der Datensatz als Durchläufer abgespeichert. Dieses Vorgehen ist von [Müll 15] inspiriert, der in seiner Arbeit unter anderem das Perlenschnurverfahren im Zeitfestigkeitsbereich sowie Treppenstufenversuche, jedoch mit Streuung in Lastrichtung, simuliert. Entsprechend des Treppenstufenverfahrens wird anschließend der folgende Lasthorizont bestimmt, auf welchem die Berechnung nach demselben Verfahren durchgeführt wird. Pro Versuchsreihe wird hier ein Probenumfang von 15 Proben festgelegt. Insgesamt werden beispielhaft 10.000 Versuchsreihen simuliert, aus denen anschließend mit dem vorgestellten Algorithmus die Wöhlerlinie abgeschätzt wird. Ein Vergleich der so bestimmten Wöhlerlinien mit der vorgegebenen Master-Wöhlerlinie erlaubt nun eine Bewertung des Algorithmus.

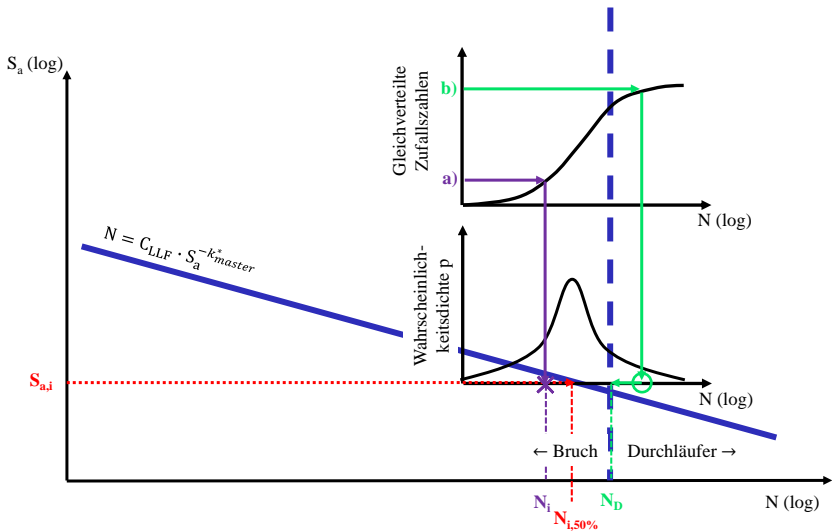


Abbildung 4.28: Simulation von Versuchsdaten mit Hilfe der Inversionsmethode (vgl. [Müll15])

In Abbildung 4.29 sind die für die simulierten Versuchsdaten berechneten Neigungen k^* bezogen auf die Neigung der Master-Wöhlerlinie k_{Master}^* im Wahrscheinlichkeitspapier dargestellt. Die Wahrscheinlichkeiten sind nach Rossow bestimmt, [Ross 64]. Die bestimmte Neigung entspricht im Mittel der Neigung der vorgegebenen Master-Wöhlerlinie und ist damit erwartungstreu. Für einzelne Versuchsreihen kann sie jedoch stark abweichen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Müller in [Müll 15], der unter anderem die Neigungsschätzung im Zeitfestigkeitsbereich mit dem Perlenschnurverfahren untersucht. Müller zeigt, dass eine geringe Spreizung bei den untersuchten Spannungsamplituden zu einer hohen Unsicherheit bei der Neigungsschätzung führt. Die Randbedingungen bei Untersuchungen im Langzeitfestigkeitsbereich erlauben jedoch nur geringe Spreizungen, sodass sich die hohe Unsicherheit bei der Neigungsbestimmung nicht umgehen lässt. Aus diesem Grund wird der Algorithmus nicht zur Bestimmung der Neigung der Wöhlerlinie für einzelnen Versuchsreihen verwendet, sondern zur Bestimmung eines werkstoffgruppenabhängigen Medians der Neigung aus mehreren Versuchsreihen.

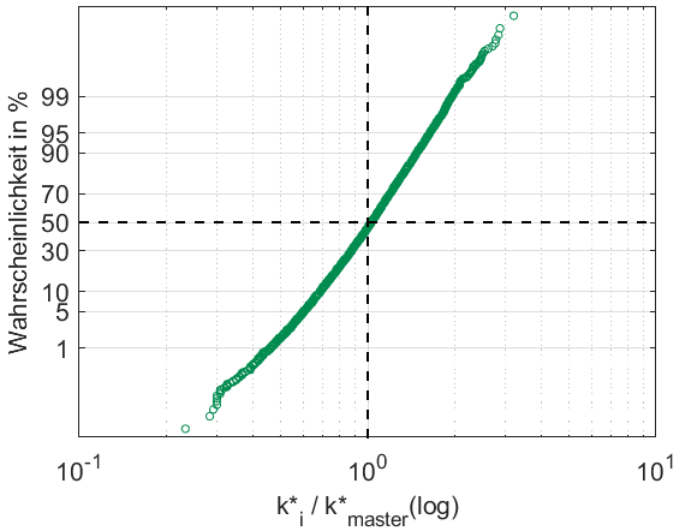


Abbildung 4.29: Simulationsergebnisse für die Neigung k^*

4.5.2.3 Anwendung des Algorithmus

Aus den oben genannten Gründen wird der Algorithmus genutzt, um die Neigung der Wöhlerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich werkstoffgruppenabhängig für ADI-Guss zu bestimmen. Die werkstoffgruppenabhängige Angabe der Neigung ist auch bei anderen Werkstoffgruppen üblich, so wird z.B. in [DIN 50100] eine werkstoffgruppenabhängige Wöhlerlinienneigung für den Langzeitfestigkeitsbereich k^* für die Werkstoffgruppen Stahl und Aluminium gegeben. Diese Werte finden Anwendung, wenn keine genaueren Kenntnisse vorliegen.

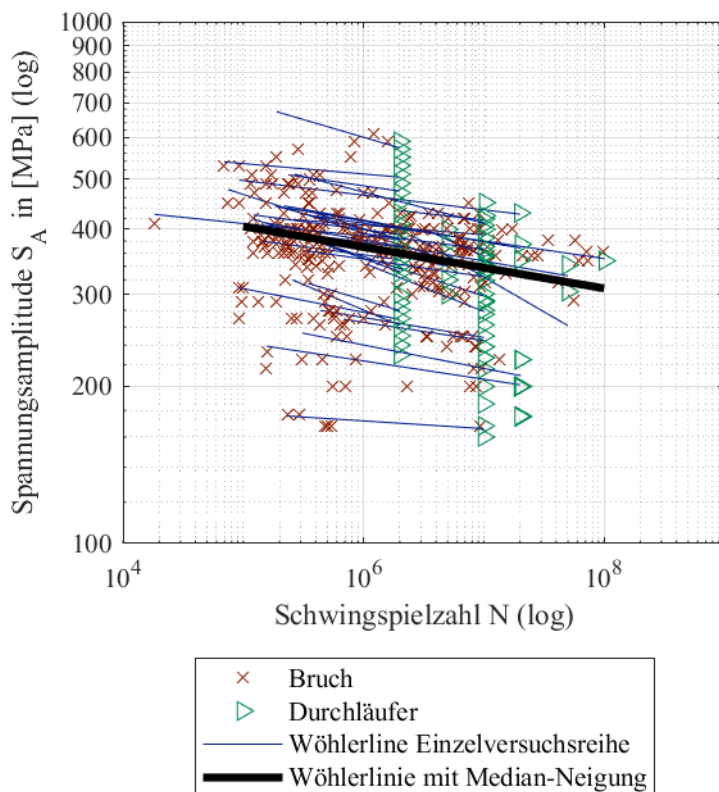


Abbildung 4.30: Bestimmung der Wöhlerlinienneigung im Langzeitfestigkeitsbereich

In die Berechnungen gehen die Versuchsdaten aus den im Projekt durchgeführten Langzeitfestigkeitsversuchen sowie Literaturdaten aus [LEA 11], [Khal 05] und [Wohl 11 a+b] ein. Das entspricht insgesamt einem Versuchsumfang von 34 Versuchsreihen. Die Daten stammen dabei von Versuchen an verschiedenen ADI-Werkstoffen bei unterschiedlichen Belastungsarten und Belastungsverhältnissen. Die Ergebnisse der einzelnen Versuchsreihen sind in Abbildung 4.30 dargestellt. Die Streuung der Ergebnisse zeigt sich bei einer Auftragung im

Wahrscheinlichkeitspapier, Abbildung 4.31. Die Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten erfolgt dabei nach Rossow, [Ross 64]. Der Median der Wöhlerlinienneigung ergibt sich zu $k^*_{\text{median}} = 25,25$.

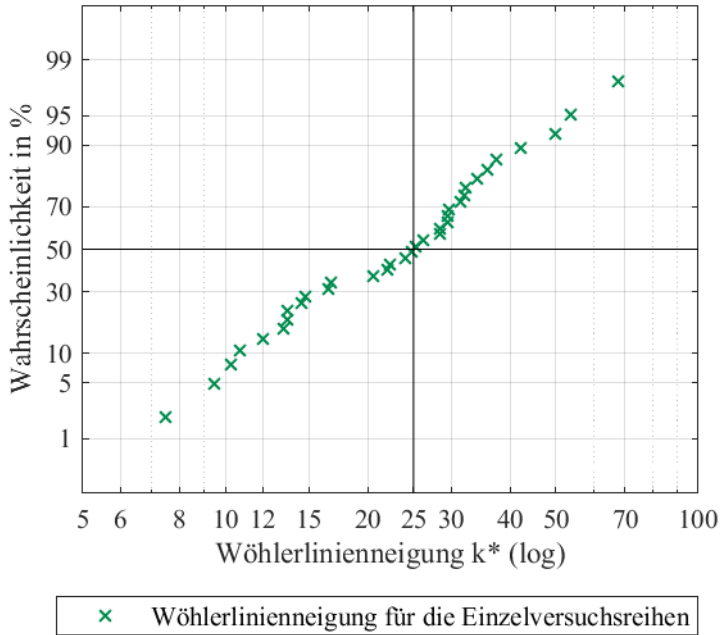


Abbildung 4.31: Streuung der für die Einzelversuchsreihen bestimmten Wöhlerlinienneigungen

Aufbauend auf den Berechnungsergebnissen wird die Verwendung einer Wöhlerlinienneigung im Langzeitfestigkeitsbereich von $k^* = 25$ vorgeschlagen. Diese wird in der vorliegenden Arbeit für alle ermittelten Wöhlerlinien verwendet.

4.5.3 Gegenüberstellung der ermittelten Wöhlerlinien

In Abbildung 4.32 sind die unter Flachbiegebeanspruchung ermittelten Wöhlerlinien der Werkstoffe GJS 800-8 und GJS 1400-1 für die Spannungsverhältnisse $R = -1$ und $R = 0$ dargestellt. Die Neigung der Wöhlerlinien im Zeitfestigkeitsbereich liegt für beide, Werkstoff und Spannungsverhältnisse, im Bereich von $k = 7 - 8$. Im Zeitfestigkeitsbereich liegen die Wöhlerlinien bei wechselnder Beanspruchung im selben Streuband. Die Langzeitfestigkeit des GJS 1400-1 ist jedoch geringer als die des GJS 800-8. Bei schwelender Beanspruchung ist die Beanspruchbarkeit des GJS 1400-1 bereits im Zeitfestigkeitsbereich erkennbar geringer.

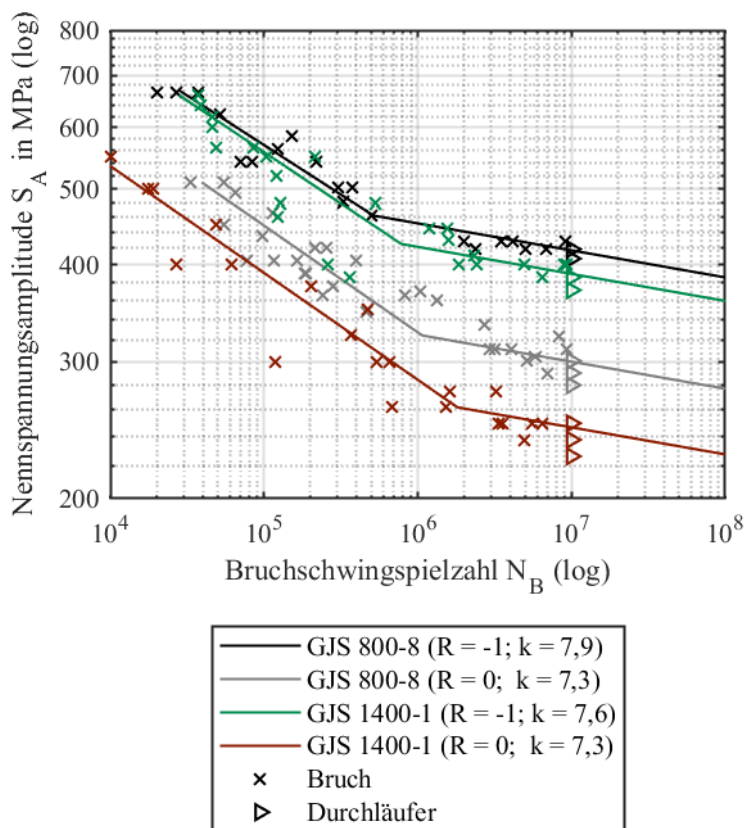


Abbildung 4.32: Wöhlerlinien der Werkstoffe: GJS 800-8 und GJS 1400-1 unter Flachbiegebeanspruchung

Unter Torsionsbeanspruchung weichen die Wöhlerlinienneigungen der beiden Werkstoffe deutlich voneinander ab, Abbildung 4.33. Für den GJS 800-8 verlaufen die Wöhlerlinien im Zeitfestigkeitsbereich deutlich flacher als im Fall der Biegung. Dieses Verhalten unter Torsion entspricht den Erwartungen, so ist z.B. in [FKM 12] ein flacherer Wöhlerlinienverlauf für Schubbelastungen gegeben. Für den höherfesten GJS 1400-1 verlaufen die Wöhlerlinien jedoch steiler als im Fall der Biegung.

Im Langzeitfestigkeitsbereich sind die Verhältnisse der Festigkeiten für die unterschiedlichen Spannungsverhältnisse und Werkstoffe mit denen im Fall der Flachbiegung vergleichbar.

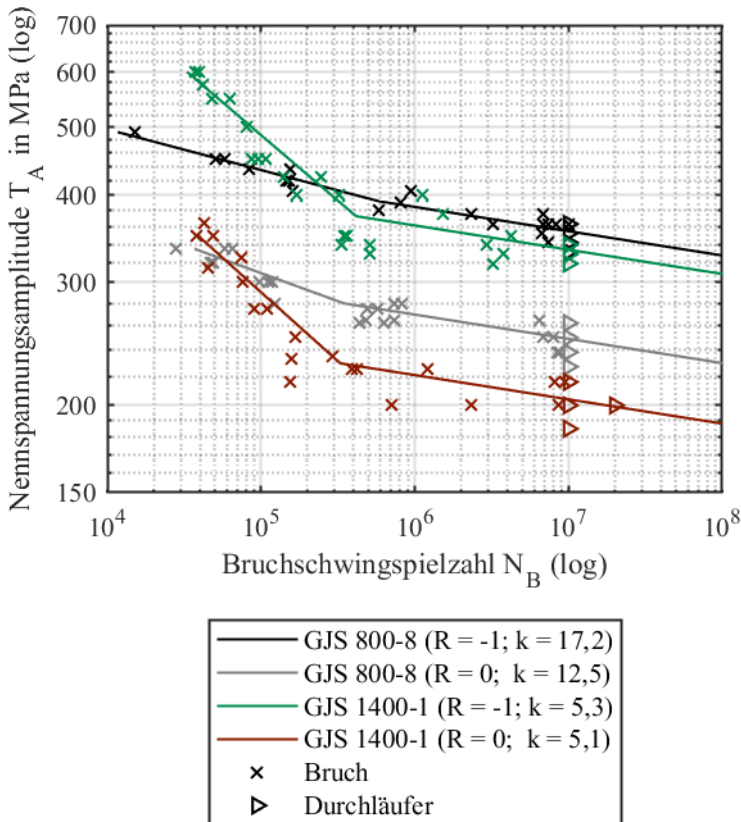


Abbildung 4.33: Wöhlerlinien der Werkstoffe: GJS 800-8 und GJS 1400-1 unter Torsionsbeanspruchung

4.5.4 Betrachtung der Rissausgangspunkte

Die Anrisse entstehen sowohl an der Bauteiloberfläche als auch unter der Oberfläche. In Abbildung 4.34 links ist ein Anriss im Probeninneren dargestellt. Der Anrissort ist hier gut an dem sich darum befindlichen Fischauge zu erkennen. Das rechte Bild zeigt einen Anriss an bzw. nahe der Oberfläche. Der Anrissort ist hier schwieriger zu erkennen, da sich kein Fischauge ausbildet. In der Detailaufnahme des Anrisses aus dem Bauteilinneren, Abbildung 4.35, ist zu erkennen, dass der Anriss von einer Pore im Gusswerkstoff ausgeht. Ein solcher Rissbeginn ist bei einem Großteil der Proben zu erkennen.

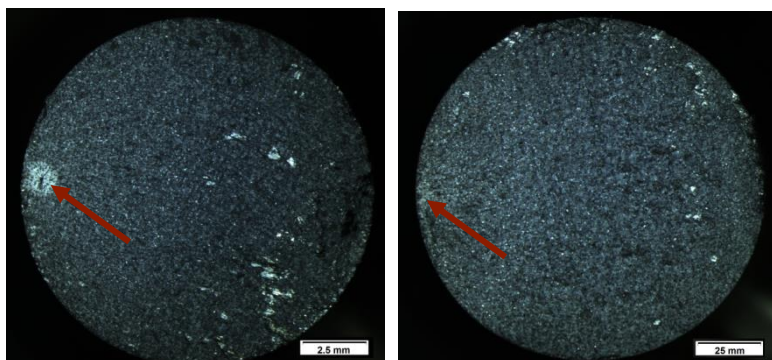


Abbildung 4.34: links: Anriss im Bauteilinneren (GJS 800-8; $R = 0$; H3);
rechts: Anriss an der Bauteiloberfläche (GJS 800-8; $R = 0$; A4)

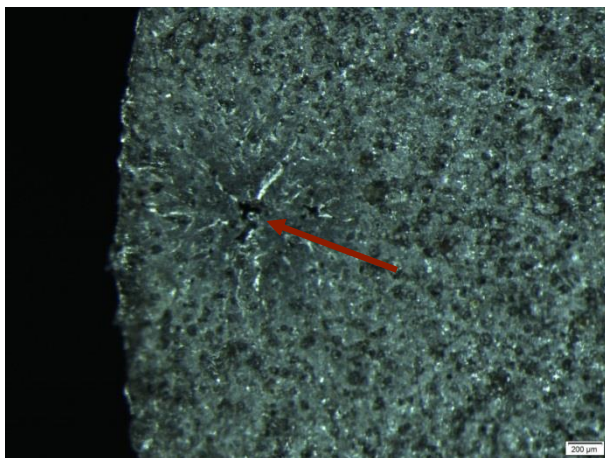


Abbildung 4.35: Detailansicht des Anrisses aus Abbildung 4.34 links

In Abbildung 4.36 ist eine Pore auf der Bruchfläche einer geprüften Probe aus GJS 800-8 dargestellt. Die Aufnahme ist mit einem Raster-Elektronen-Mikroskop aufgenommen. Neben einer Pore sind eine Vielzahl von kleinen Rissen zu erkennen, siehe Pfeile. Die vielen kleinen Risse deuten auf ein ausgeprägtes Mikrorisswachstum bereits vor dem Versagen hin.

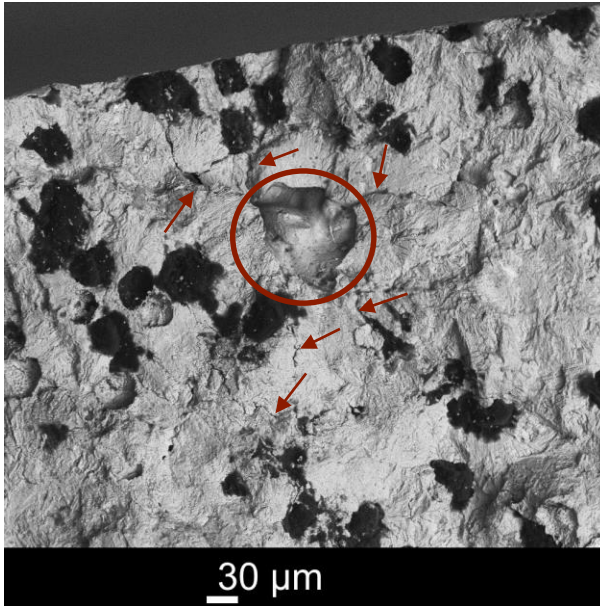


Abbildung 4.36: Pore auf der Bruchfläche einer Probe (im Kreis) mit vielen feinen Rissen (Pfeile). Werkstoff: GJS 800-8

In den folgenden Abbildung 4.37 und 4.38 sind die Rissausgangsorte erfasst. Die Versuchsergebnisse sind hier jeweils abhängig vom Rissausgangsort mit unterschiedlichen Symbolen in ein Wöhlerdiagramm eingetragen.

Es zeigt sich, dass für beide Werkstoffe belastungsunabhängig sowohl Anrisse an der Oberfläche als auch im Bauteilinneren auftreten. Bei einigen Proben ist nicht eindeutig zu erkennen, wo der Anriss entstanden ist. Beim GJS 800-8 (Abbildung 4.37) liegen über den kompletten, untersuchten Lebensdauerbereich sowohl Anrisse im Bauteilinneren, als auch an der Oberfläche vor. Dabei liegt bei Proben, die auf dem jeweiligen Lastniveau bereits relativ früh versagen, der Anrissort vermehrt an der Oberfläche. Andersrum liegt der Anrissort bei Versuchsproben mit relativ hohen Lastwechselzahlen meist im Inneren. Dies deckt sich mit den Beobachtungen aus [Zhan 15] und [Wohl 11b].

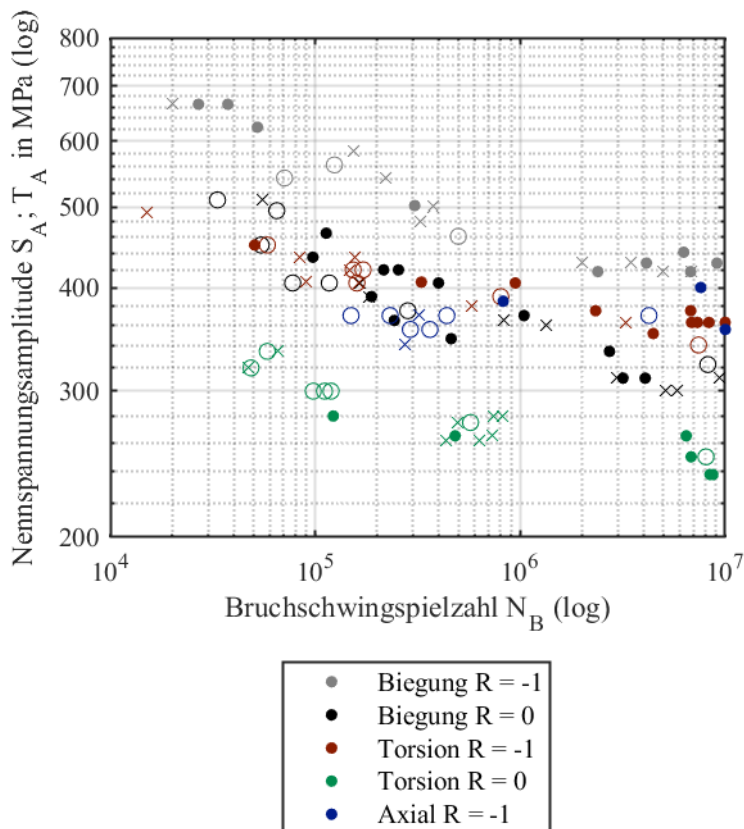


Abbildung 4.37: Erfassung der Rissausgangsorte beim Werkstoff GJS 800-8; (o) Oberflächenanriss; (•) Anriss aus dem Bauteilinneren; (x) nicht eindeutig

Für den Werkstoff GJS 1400-1 (Abbildung 4.38) liegen die Anrisse bei höher belasteten Proben tendenziell eher an der Oberfläche und bei hohen Lebensdauern eher im Bauteilinneren. Dies deckt sich mit Beobachtungen von [Jedd 18] an hochfesten Stählen. Der Übergang von Anrissen an der Oberfläche hin zu Anrissen aus dem Probeninneren erfolgt dabei im Bereich der ermittelten Ecklastschwingspielzahlen.

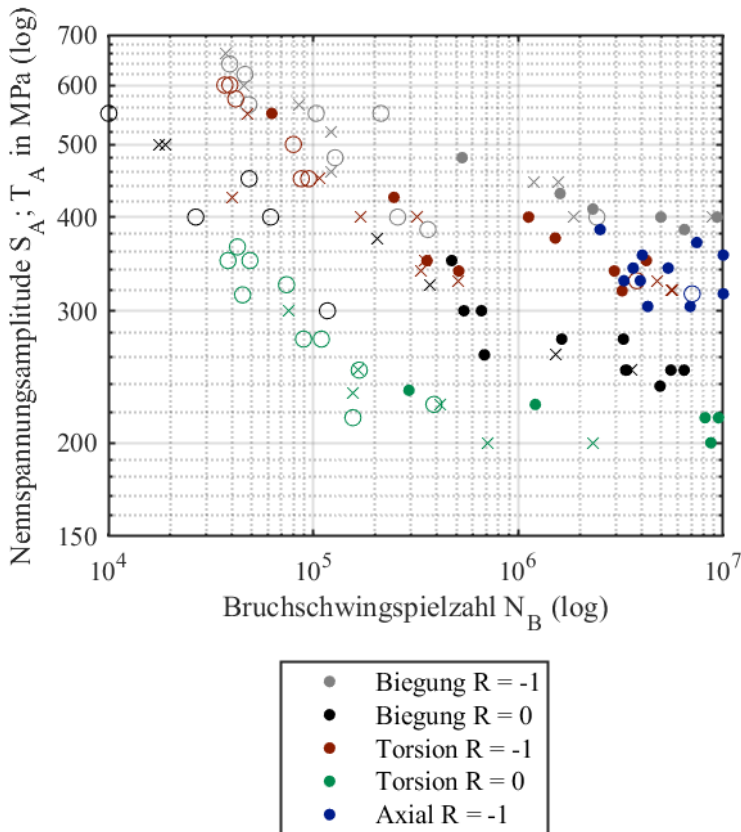


Abbildung 4.38: Erfassung der Rissausgangsorte beim Werkstoff GJS 1400-1; (o) Oberflächenanriss; (•) Anriss aus dem Bauteilinneren; (x) nicht eindeutig

Zur genaueren Betrachtung des Einflusses von Lunkern und anderen Fehlstellen im Gefüge auf die Schwingfestigkeit, werden die Bruchflächen der Zugdruckproben genauer betrachtet. Die sichtbaren Fehlstellen auf den Bruchflächen, die vermutlich den Rissausgangspunkt darstellen, werden unter einem Mikroskop vermessen. Aufgenommen wird die sichtbare Querschnittsfläche des Fehlers auf der Bruchebene sowie dessen Tiefe unter der Bauteiloberfläche. Diese Erfassung lässt nur eine begrenzte Bewertung der Fehler zu, da unter anderem die Fehlerausdehnung in Tiefenrichtung nicht erfasst werden kann. Auch die Vermessung der Fehlerausdehnung in der Bruchebene ist, aufgrund von zum Teil nur schwer zu erkennbaren Fehlergrenzen, fehlerbehaftet. Hinzu kommt,

dass nicht immer eine eindeutige Zuordnung des Rissausgangs zur Fehlstelle möglich ist.

Zur Bewertung des Einflusses der Fehler wird die logarithmische Differenz der Lastwechselzahl bis zum Bruch der untersuchten Probe ($N_{i,B}$) zur Lastwechselzahl der ermittelten Wöhlerlinie ($N_{i,W}$) bestimmt, Gleichung (4.3). Ein Wert von Null entspricht dabei einer mittleren Lebensdauer. Ein positiver Wert entspricht einer überdurchschnittlichen und ein negativer Wert einer unterdurchschnittlichen Lebensdauer.

$$N_{diff,log} = \log N_{i,B} - \log N_{i,W} \quad (4.3)$$

In Abbildung 4.39 ist die Lebensdauerdifferenz in Abhängigkeit der Fehlerlage und Größe für die Zugdruckproben aus GJS 800-8 aufgetragen. Die Größe wird dabei als Wurzel der Fehlerfläche angegeben, vgl. Abschnitt 3.1.4. Es zeigt sich, dass vor allem Fehler an der Oberfläche und oberflächennahe Fehler lebensdauerverkürzend wirken. Fehler unterhalb der Oberfläche wirken sich weniger stark auf die Lebensdauer aus. Größere Fehler führen dabei tendenziell zu geringeren Lebensdauern, wobei die Lage des Fehlers jedoch entscheidender für die Lebensdauer zu sein scheint. Für den Werkstoff GJS 1400-1 ergibt sich ein leicht abweichendes Bild, vgl. Abbildung 4.40. Hier liegen die Fehlstellen, von denen vermutlich der Anriss erfolgt, tendenziell weiter unter der Oberfläche.

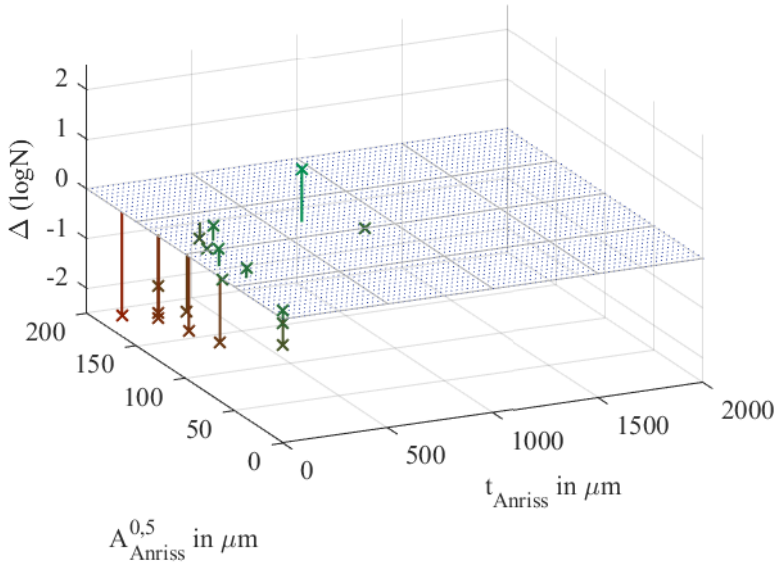


Abbildung 4.39: Einfluss von Fehlergröße und Tiefe auf die Lebensdauer am Beispiel der Zugdruckproben aus GJS 800-8

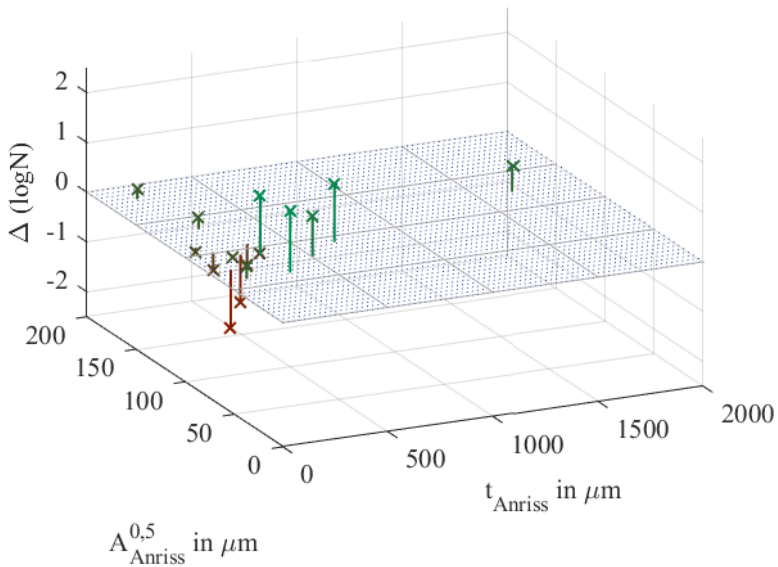


Abbildung 4.40: Einfluss von Fehlergröße und Tiefe auf die Lebensdauer am Beispiel der Zugdruckproben aus GJS 1400-1

5 Rechnerische Auslegung von ADI-Gussbauteilen

Die FKM-Richtlinie [FKM 12], als Standardwerk für den rechnerischen Festigkeitsnachweis von Maschinenbauteilen aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen, bildet die Grundlage für die durchgeführten Berechnungen. Zunächst sollen hier die einzelnen Berechnungsschritte bzw. Einflussgrößen nach [FKM 12] untersucht werden, um im Anschluss darauf aufbauend Anpassungen für die Anwendung der FKM-Richtlinie auf ADI-Gussbauteile vorzuschlagen. Die Berechnungen werden dabei auf Basis linear-elastisch berechneter örtlicher Spannungen durchgeführt.

5.1 Einflussgrößen auf die Schwingfestigkeit

Im Folgenden werden die in Kapitel 3.4 vorgestellten Einflussgrößen in Bezug auf ihre Anwendbarkeit auf ADI-Werkstoffe untersucht. Zunächst erfolgt ein Abgleich mit dem derzeitigen Stand der Richtlinie. Im Anschluss wird auf Anpassungen und mögliche Verbesserungen eingegangen.

5.1.1 Abhängigkeit von Werkstoff-Wechselstfestigkeit und Zugfestigkeit

Die FKM-Richtlinie [FKM 12] geht von einem linearen Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit R_m und Werkstoff-Wechselstfestigkeit $\sigma_{w,zd}$ aus. Die Wechselstfestigkeit eines Werkstoffs unter Zugdruckbelastung wird dabei mit dem Zugdruckwechselstfestigkeitsfaktor $f_{w,\sigma}$ aus der Zugfestigkeit bestimmt, Gleichung (5.1). Der Zugdruckwechselstfestigkeitsfaktor ist Werkstoffgruppenabhängig in [FKM 12] gegeben. Für GJS Werkstoffe beträgt er $f_{w,\sigma} = 0,34$.

$$\sigma_{w,zd} = f_{w,\sigma} \cdot R_m \quad (5.1)$$

[FKM 12] Gleichung (4.2.1)

In Abbildung 5.1 ist die Werkstoff-Wechselstfestigkeit nach FKM-Richtlinie beispielhaft experimentell ermittelten Werkstoff-Wechselstfestigkeiten gegenübergestellt. Die experimentell ermittelte Werkstoff-Wechselstfestigkeit wird mit der nach FKM aus der Zugfestigkeit berechneten Wechselstfestigkeit verglichen. Versuchsergebnisse die nicht für ungekerbte Proben unter wechselnder Zug-/Druckbeanspruchung vorliegen werden mit Hilfe der FKM-Richtlinie auf diesen Zustand zurückgerechnet.

Die Versuchsergebnisse spiegeln den in [FKM 12] angenommenen Schwingfestigkeitsanstieg mit steigender Zugfestigkeit des Werkstoffs nicht wider. Im Bereich niedrigerer Zugfestigkeiten steigt die Schwingfestigkeit noch mit steigender Zugfestigkeit an. Im Bereich höherer Zugfestigkeiten fällt die

Schwingfestigkeit jedoch wieder ab. Dieses Verhalten ist auch bereits in [DIN 1564], [Gilb 86], [Lin 98] und [Bahm 97] nachgewiesen.

Damit ist das in der FKM-Richtlinie beschriebene Vorgehen, zur Bestimmung der Werkstoff-Wechselspannungsfestigkeit aus der Zugfestigkeit, für ADI-Werkstoffe nicht gültig. Zur Beschreibung des Zusammenhangs von Zugfestigkeit und Wechselspannungsfestigkeit wird dementsprechend ein anderer Ansatz benötigt.

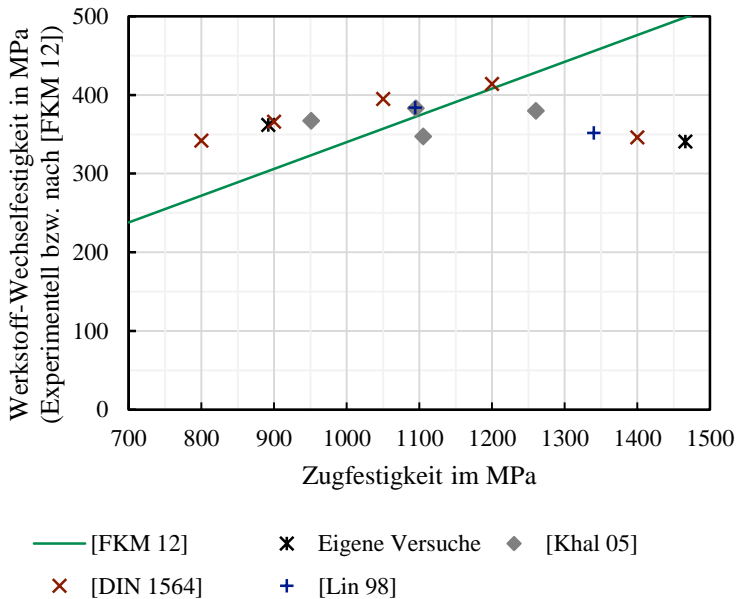


Abbildung 5.1: Werkstoff-Wechselspannungsfestigkeit in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit; Vergleich: FKM-Richtlinie mit Versuchsdaten

5.1.2 Einfluss der Geometrie

Der Einfluss der Geometrie wird, im Fall des Ermüdungsfestigkeitsnachweises mit örtlichen Spannungen, in der FKM-Richtlinie auf Basis des Konstruktionsfaktors, Gleichung (5.2), berücksichtigt. Darin enthaltene Faktoren zur Berücksichtigung der Schwingfestigkeitseinflüsse der Oberfläche sind nicht Inhalt der vorliegenden Arbeit, da ausschließlich Proben mit bearbeiteter Oberfläche untersucht werden.

$$K_{WK,\sigma} = \frac{1}{n_\sigma} \left[1 + \frac{1}{\widetilde{K}_f} \cdot \left(\frac{1}{K_R} - 1 \right) \right] \cdot \frac{1}{K_V \cdot K_S} \quad (5.2)$$

[FKM 12] Gleichung (4.3.1)

n_σ	Stützzahl	
\widetilde{K}_f	Schätzwert der Kerbwirkungszahl	
K_R	Rauheitsfaktor	
$K_V = 1$	Randschichtfaktor	Keine Randschichtverfestigung
$K_S = 1$	Schutzschichtfaktor	Keine Schutzschicht

Die Haupteinflussgröße ist die Stützzahl n_σ . Die Oberflächenrauigkeit hat, aufgrund der hier untersuchten glatten Versuchsproben, keinen bzw. nur einen sehr geringen Einfluss. K_R wird daher auf 1. \widetilde{K}_f wird nur bei gekerbten Proben größer 1. Eine Randschichtbehandlung bzw. der Einfluss von Schutzschichten ist nicht Bestandteil der Untersuchungen.

5.1.2.1 Stützzahl

In ausgeführten Bauteilen liegt im Allgemeinen eine inhomogene Spannungsverteilung vor. Die Festigkeit eines Bauteils ist dabei von der Spannungsverteilung abhängig. Dieser Einfluss wird durch die Stützzahl erfasst. Zur Bestimmung der Stützwirkung existieren in [FKM 12] zwei unterschiedliche Ansätze. Der ältere und in der Anwendung etwas einfachere Ansatz, sind die Stützzahlen nach Stieler, [Stie 54]. Hier erfolgt die Bestimmung der Stützzahl werkstoffgruppenabhängig auf Basis des bezogenen Spannungsgradienten und der Zugfestigkeit. Die Bauteilgröße geht bei dieser Betrachtung nur indirekt über den bezogenen Spannungsgradienten in die Betrachtung ein. Dieser Ansatz kann z.B. einen Festigkeitsunterschied zwischen Flach- und Umlaufbiegung, wie er z.B. bei den Untersuchungen in Abschnitt 4.4.1 zu sehen ist, nicht beschreiben.

Mit den werkstoffmechanischen Stützzahlen existiert ein neuerer physikalisch begründeter Ansatz. Die werkstoffmechanischen Stützzahlen setzen sich aus der statistischen Stützzahl n_{st} , die den statistischen Größeneinfluss berücksichtigt, der verformungsmechanischen Stützzahl n_{vm} , die die Makrostützwirkung nach Neuber beschreibt, und der bruchmechanischen Stützzahl n_{bm} , die den Einfluss großer Spannungsgradienten auf das Risswachstum beschreibt, zusammen, [FKM 12], [Liu 01], [Häne 10] Gleichung (5.3).

$$n_{\sigma} = n_{st} \cdot n_{vm} \cdot n_{bm} \quad (5.3)$$

[FKM 12] Gleichung (4.3.10)

Hier wird die Nutzung der werkstoffmechanischen Stützzahlen empfohlen. Der physikalisch begründete Ansatz erfasst die unterschiedlichen Einflüsse getrennt und kann somit die am Bauteil vorliegenden Beanspruchungszustände besser wiedergeben. Ein Beispiel ist hier der statistische Größeneinfluss. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Größe des hochbeanspruchten Bereichs einen Einfluss auf die Schwingfestigkeit hat, vgl. Ergebnisse Umlauf- und Flachbiegeversuche, Tabelle 4.7. Dieser Einfluss kann auf Basis der statistischen Stützzahl, nicht jedoch durch die Stützzahlen nach Stieler, erfasst werden.

Die **statistische Stützzahl** kann auf Basis der hochbeanspruchten Oberfläche oder auf Basis des hochbeanspruchten Volumens bestimmt werden. Für Stahlwerkstoffe, bei denen der Anriss im Allgemeinen an der Bauteiloberfläche erfolgt, wird üblicherweise die hochbeanspruchte Oberfläche genutzt. Die durchgeführten Versuche am Werkstoff ADI zeigen jedoch, dass hier vermehrt Anrisse aus dem Werkstoffinneren auftreten, Abschnitt 4.5.4. Aus diesem Grund ist das hochbeanspruchte Volumen für die Berechnung der statistischen Stützwirkung heranzuziehen, Gleichung (5.4).

$$n_{st} = \left(\frac{V_{ref,st}}{V_{\sigma,st}} \right)^{\frac{1}{k_{st}}} \quad (5.4)$$

[FKM 12] Gleichung (4.3.11)

$V_{ref,st}$	Hochbeanspruchtes Volumen einer Referenzprobe
$V_{\sigma,st}$	Hochbeanspruchtes Volumen des Bauteils
k_{st}	Weibull-Exponent

Das hochbeanspruchte Volumen wird in dieser Arbeit mit der Methode „SPIEL“ (Spannungsintegral aus Einheitslastfällen) bestimmt, [Diem 04]. Einzelheiten

zur Bestimmung des hochbeanspruchten Volumens sind im Anhang 9.1 dargestellt.

Das Referenzvolumen ist in der Richtlinie nicht direkt gegeben. Die Referenzoberfläche, die gegeben ist, wird durch eine Rundprobe mit einem Durchmesser von 8 mm und einer zylindrischen Länge von 20 mm definiert. Wird dieselbe Probengeometrie für das Referenzvolumen herangezogen, ergibt sich dies zu 1000 mm³. Der Weibull-Exponent ist mit $k_{st} = 10$ für GJS-Werkstoffe gegeben.

Die **verformungsmechanische Stützzahl** beschreibt die Makrostützwirkung nach Neuber. Ihr liegt die Beobachtung zu Grunde, dass bereits bei Spannungen in Höhe der Dauerfestigkeit bzw. Langzeitfestigkeit plastische Dehnungen im Bauteil auftreten. Liegt im Bauteil eine inhomogene Spannungsverteilung vor, ist damit die maximale, linear-elastisch berechnete Spannung höher als die sich bei realistischerem elastisch-plastischen Werkstoffverhalten ergebene maximale Spannung. Dieser Spannungsunterschied wird auf Basis der verformungsmechanischen Stützwirkung berücksichtigt, [Liu 91a].

In [FKM 12] wird die verformungsmechanische Stützwirkung nach Gleichung (5.7) bestimmt. Diese Gleichung wird in [Liu 91a] auf Basis der Neuber-Formel abgeleitet. Das Vorgehen zur Bestimmung der Gesamtstützwirkung ist in Abbildung 5.2 dargestellt, [Liu 91a]. Sie setzt sich aus der statistischen und verformungsmechanischen Stützwirkung zusammen. Wobei die verformungsmechanische Stützwirkung über die Neuber-Hyperbel und das zyklische Werkstoffverhalten abgeschätzt wird.

$$n_{vm} = \sqrt{1 + \frac{E \cdot \varepsilon_{pl,W}}{\sigma_W} \cdot (n_{st})^{\frac{1}{n'} - 1}} \quad (5.5)$$

[FKM 12] Gleichung (4.3.14)

$\varepsilon_{pl,W}$ Dauerfest ertragbare wechsellastische
Dehnung

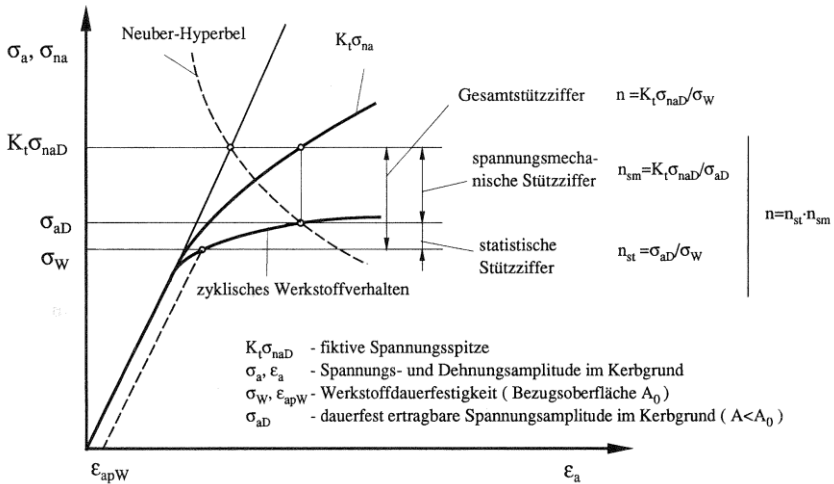


Abbildung 5.2: Bestimmung der aus der statistischen und verformungsmechanischen Stützziffer zusammengesetzten Gesamtstützziffer [Liu 91a]

Die Neuber-Formel wurde für scharf gekerbte Bauteile unter Schubbeanspruchung entwickelt [Neub 68], [Neub 61]. Ihre Anwendbarkeit muss insbesondere für milde Kerben (wie im vorliegenden Fall der eigenen Versuche) in Frage gestellt werden. Alternativ kann eine elastisch-plastische FE-Berechnung durchgeführt werden. Dazu wird im FE-Programm die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve hinterlegt, und die Werkstoffprobe mit der dauerhaft ertragbaren Belastungsamplitude beaufschlagt. Das Verhältnis zwischen der maximalen linear-elastisch und der maximalen elastisch-plastisch berechneten Spannung entspricht der verformungsmechanischen Stützzahl, Gleichung (5.6), [Liu 91a].

$$n_{vm} = \frac{K_t \cdot \sigma_{na}}{\sigma_a} \quad (5.6)$$

$K_t \sigma_{na}$ Fiktive elastisch-theoretisch errechnete
Kerbspannungsamplitude

σ_a Wirkliche Spannungsamplitude

Die verformungsmechanische Stützwirkung wird nach [FKM 12] nur für duktile Stähle und Aluminiumknetlegierungen bestimmt. Für den vorliegenden Gusswerkstoff wird sie zu eins gesetzt.

Eine **bruchmechanische Stützwirkung** tritt nur in Bereichen sehr großer Spannungsgradienten auf. In diesen Bereichen wachsen Ermüdungsrisse langsamer,


















da aufgrund des hohen Spannungsgradienten die Riss Spitze aus dem hochbeanspruchten Bereich herauswächst, [FKM 12]. Für einen solchen Effekt sind sehr große Spannungsgradienten erforderlich. Hier wird die bruchmechanische Stützwirkung zu $n_{bm} = 1$ gesetzt. Dies ist zum einen darin begründet, dass die sogenannte Referenz-Zugfestigkeit, die für die Berechnung benötigt wird, für Eisengusswerkstoffe nicht gegeben ist. Zum anderen sind die bezogenen Spannungsgradienten der untersuchten, zumeist ungekerbten Proben relativ gering, sodass sich bei Berechnungen auf Basis der Daten von Stahl ebenfalls eine bruchmechanische Stützzahl von $n_{bm} = 1$ ergibt. Die vorliegenden Ergebnisse für gekerbte Proben, für die das Vorhandensein einer bruchmechanischen Stützwirkung in Frage kommt, reichen wiederum nicht aus, um eine Referenz-Zugfestigkeit auf ihrer Basis abzuschätzen.

5.1.2.2 Abgleich der Stützzahlen nach [FKM 12] mit Versuchsergebnissen

Zur Beurteilung der Treffsicherheit der Stützzahlen, wie sie nach [FKM 12] bestimmt werden, sind in Tabelle 5.1 die, um die Stützwirkungen bereinigten, experimentellen Langzeitfestigkeiten für Biege- und Axialbelastungen dargestellt. Wird die Stützwirkung durch die Stützzahlen treffend beschrieben, ergeben sich auf diesem Weg Werkstoff-Wechselstabilitäten, die unabhängig von der Belastungsart sind. Damit müssten die für einen Werkstoff bestimmten Werkstoff-Wechselstabilitäten für die unterschiedlichen Belastungsarten etwa gleich sein. Es zeigt sich jedoch, dass die für Biegung bestimmten Wechselstabilitäten insgesamt etwas höher sind. Dies ist ein Indiz dafür, dass die Stützwirkungen im Fall der Biegebelastung, unterschätzt werden. Eine mögliche Erklärung hierfür liegt im Weibull-Exponenten, zur Bestimmung der statistischen Stützzahl, der in [FKM 12] lediglich vorläufig mit $k_{st} = 10$ angegeben ist. Eine weitere Möglichkeit diesen Widerspruch aufzulösen, liegt in der verformungsmechanischen Stützzahl. Diese wird nach [FKM 12] für GJS zu $n_{vm} = 1$ gesetzt. Elastisch-plastische FE-Berechnungen zeigen jedoch, dass bei biegebelasteten Versuchsproben, auch im Langzeitfestigkeitsbereich, plastische Dehnungsanteile auftreten und damit auch eine verformungsmechanische Stützwirkung vorliegt, vgl. Abschnitt 5.1.2.4.

Für die aufgeführten gekerbten Proben wird die Stützwirkung nach dem Ansatz von [FKM 12] überschätzt. Hier ergeben sich, mit den nach [FKM 12] berechneten Stützzahlen, deutlich geringere bereinigte Wechselstabilitäten als für den ungekerbten Fall. Dieses Verhalten wird in Abschnitt 5.1.2.3 genauer betrachtet.

Tabelle 5.1: Versuchsergebnisse um Stützzahl nach [FKM 12] bereinigt

Ungekerbte Probengeometrie				
	$S_{A,NG,R=-1}$ [MPa]	n_σ	$S_{AD,R=-1} / n_\sigma$ [MPa]	
Eigene Versuchsergebnisse	$N_G = 10^7$			
GJS 800-8				
Zugdruck	359	1,22	294	
Flachbiegung	417	1,19	350	
Umlaufbiegung	367	1,03	356	
GJS 1400-1				
Zugdruck	327	1,22	268	
Flachbiegung	389	1,19	327	
Ergebnisse aus [Khal 05]	$N_G = 2 \cdot 10^6$			
ADI 800				
Zugdruck	368	1,09	338	
Flachbiegung	463	1,38	336	
ADI 1000				
Zugdruck	383	1,09	351	
Flachbiegung	563	1,38	408	
ADI 1200				
Zugdruck	380	1,09	349	
Flachbiegung	508	1,38	368	
ADI 1200 ₍₂₎				
Zugdruck	348	1,09	319	
Flachbiegung	473	1,38	343	
Gekerbte Probengeometrie				
Ergebnisse aus [Chap 06]	$N_G = 10^7$			
GJS 1000; Umlaufbiegung				
$K_t = 1,02$	449	1,36	330	
$K_t = 1,47$	456	1,91	239	
$K_t = 1,82$	473	2,07	229	
$K_t = 2,35$	564	2,29	246	

5.1.2.3 Betrachtung der Stützzahlen für sehr kleine hochbeanspruchte Volumina

Die hohen Stützzahlen im Fall der gekerbten Proben sind auf die sehr kleinen hochbeanspruchten Volumina zurückzuführen, Tabelle 5.2. Die statistischen Stützzahlen sind auf Basis der hochbeanspruchten Volumina, hier in Bezug auf das hochbeanspruchte Volumen der ungekerbten Probe ($K_t = 1,02$), bestimmt.

Zusätzlich sind die aus den experimentellen Versuchen ermittelten Stützwirkungen in Bezug auf die ungekerbte Probe angegeben. Diese sind deutlich geringer als die aus der statistischen Stützwirkung bestimmten Werte. Hinzu kommt, dass eine hier noch nicht berücksichtigte verformungsmechanische Stützwirkung diesen Effekt noch weiter verstärken würde.

Tabelle 5.2: Hochbeanspruchte Volumen der gekerbten Proben

Formzahl	Kerbradius	Hochbeanspruchtes Volumen	Statistische Stützzahl	Stützwirkung Versuch
[K _t]	[R in mm]	[V _{σ,st} in mm ³]	n _{st}	
1,02	50	47,12	1,00	1,00
1,47	2	1,58	1,40	1,01
1,82	1	0,70	1,52	1,05
2,35	0,5	0,25	1,69	1,25

Mit Blick auf den Spannungsverlauf im Kerbgrund, Abbildung 5.3, ist die Berechnung der statistischen Stützzahlen auf Basis dieser Volumen kritisch zu sehen. In Abbildung 5.3 ist der, auf die maximale Kerbspannung bezogene, Spannungsverlauf ins Bauteilinnere für die unterschiedlichen Kerbfälle [Chap 06], dargestellt. Zusätzlich ist der Durchmesser einer Graphitkugel in das Diagramm eingetragen. Es zeigt sich, dass im Kerbgrund der Spannungsabfall über eine Graphitkugel bei bis zu 17 % liegt.

Das hochbeanspruchte Volumen wird hier über ein Spannungsintegral nach der Methode SPIEL bestimmt, vgl. Abschnitt 9.1. Das heißt, das Volumen in dem die maximale Spannung auftritt wird zu 100 % in das hochbeanspruchte Volumen eingerechnet. Volumina in denen geringere Spannungen auftreten, werden nur anteilig berücksichtigt. Der jeweilige Anteil wird dabei über den Weibull-Exponenten bestimmt. Dieser ist in [FKM 12] mit $k_{st} = 10$ für GJS gegeben. Das heißt, das Volumen, in dem 90 % der maximalen Spannung auftreten, geht nur zu $0,9^{10}$, also ca. 35 % in das hochbeanspruchte Volumen ein. In Abbildung 5.3 ist neben dem Spannungsverlauf im Kerbgrund auch der jeweilige prozentuale Anteil am hochbeanspruchten Volumen dargestellt. Es zeigt sich, dass der Anteil am hochbeanspruchten Volumen bereits über die Strecke des Durchmessers einer durchschnittlichen Graphitkugel stark abfällt. Damit liegt die Größe der Graphitkugeln und damit die der Mikrostruktur von ADI-Werkstoffen für stark gekerbte Proben im Bereich der hochbeanspruchten Volumina.

Auf Basis dieser Ergebnisse ist das Vorgehen zur Bestimmung der statistischen Stützzahl bei sehr kleinen hochbeanspruchten Bereichen in Frage zu stellen.

Zwar ist ein statistischer Einfluss der Größe des hochbeanspruchten Bereichs durchaus zu erwarten, jedoch ist eine andere Abhängigkeit als bei großen hochbeanspruchten Volumen wahrscheinlich.

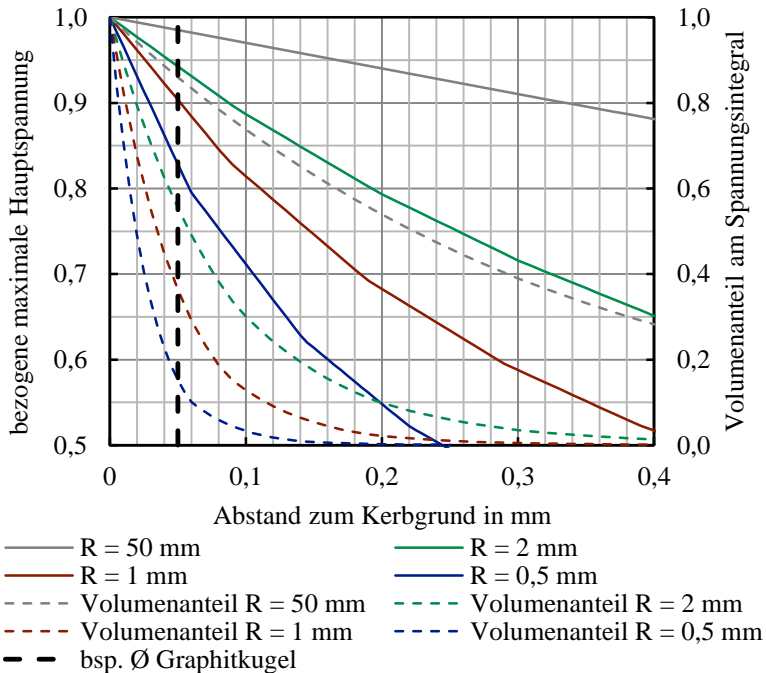


Abbildung 5.3: Spannungsabfall im Kerbgrund im Vergleich zum Durchmesser der Graphitkugeln

5.1.2.4 Plastische Verformungen im Langzeitfestigkeitsbereich

In Abbildung 5.4 sind beispielhaft der linear-elastisch und der elastisch-plastisch berechnete lokale Spannungsverlauf für eine im Projekt untersuchte Flachbiegeprobe aus GJS 800-8 dargestellt. Die Auftragung erfolgt dabei über die Tiefenkoordinate ausgehend von der Bauteiloberfläche. Die Probe ist dabei mit der im Treppenstufenverfahren ermittelten Langzeitfest ertragbaren Biegemomentenamplitude für $R = -1$ belastet, Abschnitt 4.4.1. Für die elastisch-plastische Berechnung wird die in den dehnungsgeregelten Versuchen bestimmte zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve genutzt, Abschnitt 4.4.2.

Es zeigt sich, dass die elastisch-plastisch berechnete, maximale, örtliche Spannung geringer ist als die linear-elastisch bestimmte. Dieser Unterschied entspricht nach [Liu 91a] der verformungsmechanischen Stützwirkung und führt zu einer verformungsmechanischen Stützzahl $n_{vm} \neq 1$, vgl. Abschnitt 5.1.2.1. Damit existiert auch für ADI-Werkstoffe eine verformungsmechanische Stützwirkung, deren Berücksichtigung in der Berechnung die Vorhersagegüte verbessern kann.

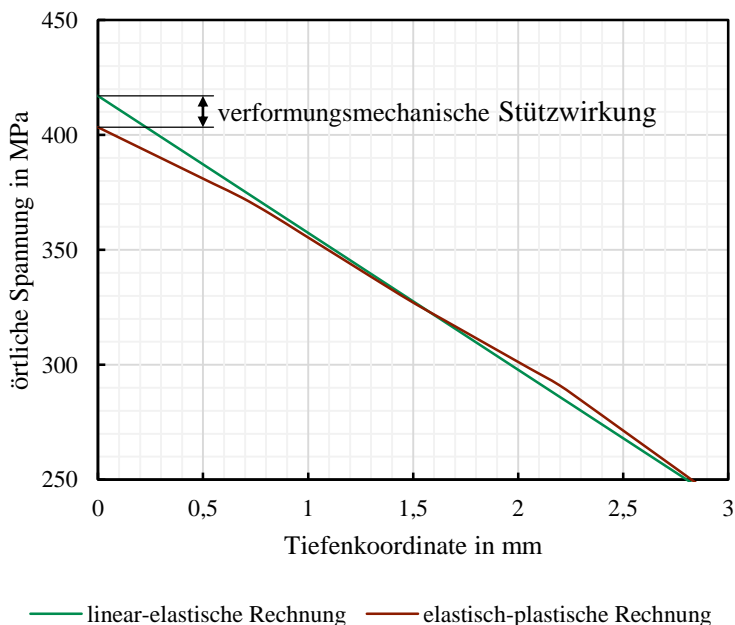


Abbildung 5.4: Vergleich des linear-elastischen und des elastisch-plastisch Spannungsverlaufs am Beispiel der Flachbiegeprobe aus GJS 800-8.

5.1.3 Mittelspannungsempfindlichkeit

Die Mittelspannungsempfindlichkeit beschreibt den Einfluss des vorliegenden Spannungsverhältnisses auf die Schwingfestigkeit. In [FKM 12] wird abhängig vom Überlastfall, dem Spannungsverhältnis und der Mittelspannungsempfindlichkeit ein Mittelspannungsfaktor berechnet, über den das Spannungsverhältnis in der Berechnung berücksichtigt wird.

Die Mittelspannungsempfindlichkeit wird dabei in Abhängigkeit von der Werkstoffgruppe und der Zugfestigkeit des Werkstoffs abgeschätzt, Gleichung (5.7). Die Mittelspannungsempfindlichkeit für Schubbeanspruchungen ergibt sich nach Gleichung (5.8) in Abhängigkeit vom Schubwechselfestigkeitsfaktor $f_{W,\tau}$.

$$M_{\sigma,FKM} = a_M \cdot 10^{-3} \cdot \frac{R_m}{\text{MPa}} + b_M \quad (5.7)$$

[FKM 12] Gleichung (4.4.5)

$a_M = 0,35$ Konstante (Wert für GJS nach [FKM 12])

$b_m = 0,08$ Konstante (Wert für GJS nach [FKM 12])

$$M_{\tau,FKM} = M_{\sigma,FKM} \cdot f_{W,\tau} \quad (5.8)$$

[FKM 12] Gleichung (4.4.5)

$f_{W,\tau} = 0,65$ Schubwechselfestigkeitsfaktor (Wert für GJS nach [FKM 12])

Die Mittelspannungsempfindlichkeit aus den Versuchsdaten kann nach Gleichung (5.9) ermittelt werden. Die Ermittlung der Mittelspannungsempfindlichkeit unter Schubbeanspruchung erfolgt analog.

$$M_{\sigma,Versuch} = \frac{\sigma_{A,W,10^7}}{\sigma_{A,S,10^7}} - 1 \quad (5.9)$$

[FKM 12] Gleichung (4.4.5)

$\sigma_{A,W,10^7}$ Langzeitfestigkeit unter Wechselnder Beanspruchung (R = -1)

$\sigma_{A,S,10^7}$ Langzeitfestigkeit unter Schwellender Beanspruchung (R = 0)

In Tabelle 5.3 sind die experimentellen Mittelspannungsempfindlichkeiten denen nach [FKM 12] abgeschätzten gegenübergestellt. Für die experimentellen Ergebnisse ist die Mittelspannungsempfindlichkeit dabei sowohl für die Grenzlastschwingenspielzahl als auch, soweit die Daten vorhanden waren, für 10^5

Lastwechsel gegeben. Die Angabe bei 10^5 Lastwechsel erfolgt, da dies die Basis für die Angaben in [FKM 12] ist.

Tabelle 5.3: Vergleich der Mittelspannungsempfindlichkeit nach [FKM 12] mit Versuchsergebnissen

Werkstoff		N	Mittelspannungsempfindlichkeit			
	Belastungsart		Versuch		Rechnerisch	
			$V_{\sigma, st} =$ konst.	$V_{\sigma, st} =$ f(R)	[FKM 12]**	angepasst**
					$f_{w, \tau} =$ 0,65	$f_{w, \tau} =$ 0,87
GJS 800-8						
	Flachbiegung	10^5	0,27	0,34	0,39	
		10^7	0,39	0,47		
	Torsion	10^5	0,40		0,25	0,34
		10^7	0,43			
GJS 1400-1						
	Flachbiegung	10^5	0,43	0,51	0,59	
		10^7	0,57	0,67		
	Torsion	10^5	0,68		0,39	0,51
		10^7	0,64			
GJS 800-8*						
	Zugdruck	$2 \cdot 10^6$	0,40		0,41	
GJS 1000-5*						
	Zugdruck	$2 \cdot 10^6$	0,38		0,46	
GJS 1200-2*						
	Zugdruck	$2 \cdot 10^6$	0,36		0,52	

*Versuchsergebnisse aus [Khal 05]; ** nur bei Torsion relevant

Die Berechnung der Mittelspannungsempfindlichkeit aus den Versuchsdaten führt im Fall der Biegung, in Abhängigkeit von der Berechnung des hochbeanspruchten Volumens, zu unterschiedlichen Ergebnissen. Im ersten Ansatz ist das hochbeanspruchte Volumen unabhängig vom Spannungsverhältnis, $V_{\sigma, \text{st}} = \text{konst.}$ Wird im Fall der schwellenden Belastung jedoch die höhere Druckfestigkeit auf der Biegedruckseite berücksichtigt, ergibt sich hier ein kleineres hochbeanspruchtes Volumen, $V_{\sigma, \text{st}} = f(R)$. Die höhere Druckfestigkeit wird hier auf Basis des Druckfestigkeitsfaktors f_{σ} , der die Druckfestigkeit gegenüber der Zugfestigkeit anhebt, berücksichtigt. Er ist in [FKM 12] mit $f_{\sigma} = 1,3$ gegeben. Der Fall $V_{\sigma, \text{st}} = \text{konst.}$ entspricht der Berechnung eines Bauteils mit rundem Querschnitt und der Bestimmung des hochbelasteten Volumens über die Abschätzformel des Nennspannungsansatzes aus [FKM12]. Der Fall $V_{\sigma, \text{st}} = f(R)$

entspricht dem Vorgehen bei der Berechnung eines allgemein geformten Bauteils aus Basis des Ansatzes mit örtlichen Spannungen. Beide Varianten werden somit in der Praxis angewendet.

Auf Basis der unterschiedlich großen hochbeanspruchten Volumina beim Fall $V_{\sigma, \text{st}} = f(R)$, existiert eine Stützwirkung zwischen wechselnder und schwellender Belastung, die zu einer höheren rechnerischen Mittelspannungsempfindlichkeit führt.

Die Mittelspannungsempfindlichkeit für Torsion wird in [FKM 12] über den Schubwechselfestigkeitsfaktor berechnet. Dieser ist in [FKM 12] mit $f_{W, \tau} = 0,65$ angegeben. Aus den Versuchsergebnissen ergibt sich jedoch ein mittlerer Schubwechselfestigkeitsfaktor von $f_{W, \tau} = 0,87$, Abschnitt 5.1.4.

Im Fall der Normalspannungen liegen experimentelle und rechnerische Mittelspannungsempfindlichkeiten in vergleichbaren Größenordnungen. Bei der Biegebeanspruchung sind die Ergebnisse, bei Berücksichtigung der höheren Druckfestigkeit, etwas höher. Physikalisch ist die Berücksichtigung der höheren Druckfestigkeit jedoch richtig und wird aus diesem Grund auch im weiteren Verlauf der Arbeit berücksichtigt. Für die axialen Versuche aus [Khal 05] ergibt sich eine Abhängigkeit von der Zugfestigkeit, die der Vorgabe aus [FKM 12] widerspricht. Dass die Bestimmung der Mittelspannungsempfindlichkeit nach [FKM 12] nicht immer zuverlässig ist, ist jedoch auch für andere Werkstoffe bekannt, vgl. [Schl 18].

Für Schubbeanspruchungen wird die Mittelspannungsempfindlichkeit nach [FKM 12] unterschätzt, dies kann jedoch zum Teil durch den angepassten Schubwechselfestigkeitsfaktor ausgeglichen werden.

5.1.4 Schubwechselfestigkeit

Die Schwingfestigkeit unter Schubbeanspruchung entspricht im Allgemeinen nicht der unter Normalbeanspruchung. Die Schubwechselfestigkeit $\tau_{W, s}$ wird in [FKM 12] aus der Wechselfestigkeit unter Normalbeanspruchung mit dem Schubwechselfestigkeitsfaktor $f_{W, \tau}$ nach Gleichung (5.10) bestimmt. Der Schubwechselfestigkeitsfaktor ist in [FKM 12] mit $f_{W, \tau} = 0,65$ für die Werkstoffgruppe GJS gegeben.

$$\tau_{W, s} = f_{W, \tau} \cdot \sigma_{W, zd} \quad (5.10)$$

[FKM 12] Gleichung (4.2.1)

Die aus den experimentellen Ergebnissen sowie aus Literaturdaten berechneten Schubwechselfestigkeitsfaktoren sind in Tabelle 5.4 dargestellt. Neben den auf Basis der werkstoffmechanischen Stützzahlen berechneten Faktoren sind auch die auf Basis der Stützzahlen nach Stieler berechneten Faktoren gegeben. Hier wird, aus den in Kapitel 5.1.2.1 genannten Gründen, die Verwendung der werkstoffmechanischen Stützzahlen empfohlen.

Es ergibt sich ein mittlerer Schubwechselfestigkeitsfaktor von $f_{W,\tau} = 0,87$. Damit ist die experimentell bestimmte Schubempfindlichkeit geringer als in [FKM 12] angenommen.

Tabelle 5.4: Experimentell bestimmte Schubwechselfestigkeitsfaktoren

Werkstoff	Schubwechselfestigkeitsfaktor auf Basis von	
	Stützzahlen nach Stieler [FKM 12]	Werkstoffmechanischen Stützzahlen [FKM 12]
GJS 800-8	0,85	0,97
GJS 1400-1	0,88	1,00
GJS 800-8*	0,75	0,81
GJS 1000-5*	0,66	0,72
GJS 1200-2*	0,76	0,83
Mittelwert:	0,78	0,87

*Versuchsergebnisse aus [Khal 05]

5.2 Anpassung der Berechnung der Bauteilfestigkeit

Im vorangegangenen Abschnitt wird die mit [FKM 12] vorliegende Methode zur Führung eines rechnerischen Festigkeitsnachweises für ADI-Gussbauteile vorgestellt und mit den Versuchsergebnissen abgeglichen. Dabei zeigt sich an unterschiedlichen Stellen Verbesserungspotenzial. Dieses soll im Folgenden, durch Anpassungen bei der Berechnung genutzt werden, um die Treffsicherheit der Berechnung zu erhöhen.

Im Folgenden werden die vorgestellten Parameter, auf Basis von experimentellen Versuchsergebnissen, angepasst. Zusätzlich wird das plastische Werkstoffverhalten in der Berechnung berücksichtigt.

Die Basis für die Anpassung der Berechnung bilden die eigenen Versuche sowie Ergebnisse aus [Khal 05]. Diese Daten zeichnen sich dadurch aus, dass unterschiedliche Belastungsarten und Belastungsverhältnisse für einen Werkstoff untersucht wurden. Dies lässt einen direkteren Rückschluss auf die unterschiedlichen Parameter zu. Des Weiteren liegt hier eine umfangreiche Dokumentation mit Einzelversuchsergebnissen vor.

5.2.1 Berücksichtigung des elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens

Die Berechnungen in Abschnitt 5.1.2.4 haben gezeigt, dass, bei Berücksichtigung des elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens, eine verformungsmechanische Stützwirkung auftritt. Für die im folgenden durchgeführte Optimierung der Berechnungsparameter wird diese, wie in Abschnitt 5.1.2.4 vorgestellt, auf Basis einer elastisch-plastischen FE-Rechnung, ausgehend von der langzeitfest ertragbaren Last, bestimmt. Auf diesem Weg kann die vorliegende verformungsmechanische Stützwirkung am genauesten bestimmt werden. Dieser Berechnungsweg ist jedoch in der Praxis, aufgrund von fehlenden Eingabedaten, im Allgemeinen nicht anwendbar.

Für die eigenen Versuche liegen die benötigten zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven aus dehnungsgeregelten Versuchen vor. Für die in [Khal 05] untersuchten Werkstoffe liegen keine zyklischen Werkstoffkennwerte vor. Hier werden sie auf Basis der Kennwerte aus [LEA 11] und den eigenen Versuchsdaten abgeschätzt, vgl. Abschnitt 9.2.

Das elastisch-plastische Materialverhalten beeinflusst neben der verformungsmechanischen Stützwirkung auch die statistische Stützwirkung. Durch die plastische Verformung im hochbeanspruchten Bereich wird die maximal auftretende Spannung reduziert. Dies hat Einfluss auf die Spannungsverteilung und

führt zu einem abweichenden hochbeanspruchten Volumen. Dies muss nach [Liu 91a] in der Berechnung berücksichtigt werden.

5.2.2 Optimierung der Berechnungsparameter

Für den Zugdruckwechselfestigkeitsfaktor hat sich gezeigt, dass der Ansatz aus [FKM 12] nicht für die komplette Breite der untersuchten Werkstoffe gültig ist. Aus diesem Grund wird der Zugdruckwechselfestigkeitsfaktor separat angepasst und in dem hier zunächst gezeigten Schritt nicht berücksichtigt. Angepasst werden somit die statistische Stützzahl, die Mittelspannungsempfindlichkeit sowie der Schubwechselfestigkeitsfaktor. Da die einzelnen Faktoren sich gegenseitig beeinflussen, wird die Optimierung für alle drei Parameter simultan mit Hilfe einer Parametervariation durchgeführt. Das Optimierungsziel ist, die Parameterkombination zu finden, mit der sich für die bei unterschiedlichen Belastungsarten und Belastungsverhältnissen durchgeführten Versuchsreihen je Werkstoff dieselbe Werkstoff-Wechselfestigkeit ergibt. Damit können nur Versuchsdaten von Werkstoffen für die Optimierung genutzt werden, für die mehrere Versuchsreihen durchgeführt wurden. Die Werkstoff-Wechselfestigkeit wird gewählt, da ohne den Zugdruckwechselfestigkeitsfaktor keine Umrechnung auf Zugfestigkeiten, den eigentlichen Ausgangspunkt der Berechnung nach [FKM 12], möglich ist.

Die statistische Stützzahl wird, wie in Abschnitt 5.1.2.1 beschrieben, auf Basis des hochbeanspruchten Volumens bestimmt. Eine Anpassung erfolgt hier über den Weibull-Exponenten. Er wird im Bereich von $k_{st} = 1$ bis 40 variiert. Die verformungsmechanische Stützzahl wird, wie in Abschnitt 5.2.1 beschrieben, berücksichtigt.

Die Mittelspannungsempfindlichkeit wird in [FKM 12] nach Gleichung (5.7) bestimmt. Die Konstante a_M ist dabei mit $a_M = 0,35$ für alle in [FKM 12] behandelten Werkstoffe, bis auf Gusseisen mit Lamellengraphit (GJL), konstant. Die Anpassung an die unterschiedlichen Werkstoffgruppen erfolgt über die Konstante b_M . Sie ist in [FKM 12] mit $b_M = 0,08$ für GJS gegeben. Hier wird sie im Bereich von $b_M = 0$ bis 0,3 variiert.

Der Schubwechselfestigkeitsfaktor wird im Bereich von $f_{w,\tau} = 0,6$ bis 1,1 variiert. Dieser Bereich ist auf Basis der Vorgabe in [FKM 12] und den Ergebnissen aus Abschnitt 5.1.4 gewählt.

5.2.2.1 Algorithmus zur Optimierung der Parameter

Zur Optimierung der vorgestellten Parameter, statistische Stützzahl, Mittelspannungsempfindlichkeit und Schubwechselfestigkeitsfaktor, wird eine

Variantenrechnung durchgeführt. Das heißt, dass für jede Kombination der Parameter eine Berechnung durchgeführt wird und im Anschluss die Kombination bestimmt wird, die die beste Übereinstimmung zwischen Berechnung und Versuch liefert.

Dazu werden die experimentell an unterschiedlichen Proben unter unterschiedlichen Belastungsbedingungen ermittelten Langzeitfestigkeiten auf Werkstoff-Wechselstabilitäten umgerechnet. Dies geschieht mit den in Abschnitt 5.2.2 vorgestellten Parametern auf Basis der FKM-Richtlinie.

Zur Bestimmung der Parameter müssen weitere Eingabedaten zur Verfügung gestellt werden, vgl. Abbildung 5.5. Zur Berücksichtigung von Schub wird die Angabe der vorhandenen Beanspruchungsart benötigt. Für die statistische Stützzahl muss das hochbeanspruchte Volumen bekannt sein. Da dieses vom Weibull-Exponenten abhängig ist, werden aus der FE-Rechnung jeweils für die einzelnen Knoten die Spannung sowie das dazugehörigen Einzelvolumen bereitgestellt. (Die Berechnung erfolgt analog zu Anhang 9.1). Zusätzlich wird die zuvor bestimmte verformungsmechanische Stützzahl in der Berechnung genutzt. Zur Bestimmung der Mittelspannungsempfindlichkeit werden schließlich noch das Spannungsverhältnis sowie die Zugfestigkeit des vorliegenden Werkstoffs benötigt.

Die Werkstoff-Wechselstabilität wird für alle Parametervariationen berechnet und in einer Matrix abgelegt. Damit ergibt sich für jede Versuchsreihe eine dreidimensionale Matrix, in der die Werkstoff-Wechselstabilitäten für die unterschiedlichen Parametervariationen enthalten sind.

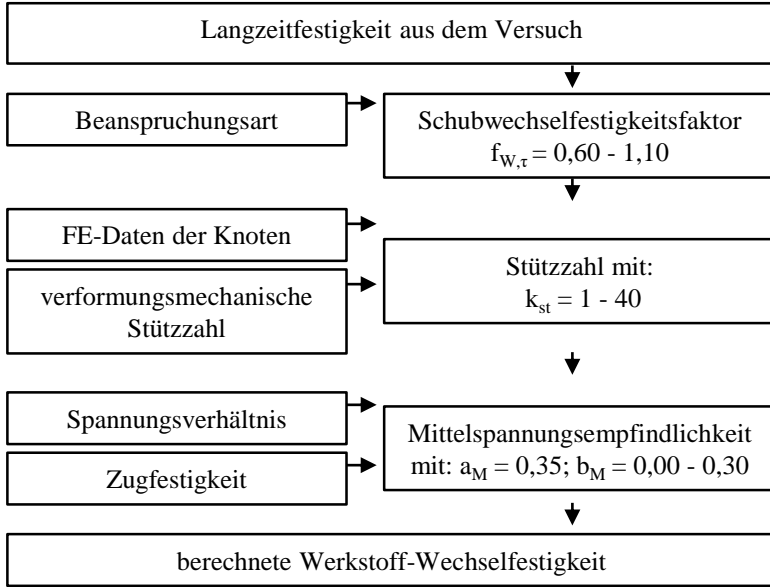


Abbildung 5.5: Bestimmung der Werkstoff-Wechselfestigkeit

Im nächsten Schritt werden für jeden Werkstoff die mittleren Werkstoff-Wechselfestigkeiten $\underline{M}_{S,AD}$ der unterschiedlichen Beanspruchungsarten n für die unterschiedlichen Parameterkombinationen bestimmt und in einer Matrix abgelegt, Gleichung (5.11).

$$\underline{M}_{S,AD} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\underline{S}_{AD,n}) \quad (5.11)$$

Im Anschluss wird die mittlere, quadratische Abweichung der Einzelergebnisse $F_{S,AD}$ vom jeweiligen Mittelwert bestimmt, Gleichung (5.12). Die Parameterkombination, für die diese Abweichung am geringsten ist, stellt die Parameterkombination dar, die die besten Ergebnisse für den jeweiligen Werkstoff liefert.

$$\underline{F}_{S,AD} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\underline{S}_{AD,n} - \underline{M}_{S,AD})^2} \quad (5.12)$$

Die Parameterkombination, die für alle vorliegenden Versuche insgesamt zu den geringsten Abweichungen führt, wird als optimale Parameterkombination im Folgenden weiterverwendet. Um diese zu bestimmen, werden die gewichteten mittleren Fehler nach Gleichung (5.13) bestimmt. Der Gewichtungsfaktor g entspricht dabei der Anzahl der pro Werkstoff vorliegenden Versuchsreihen minus eins. Die Reduktion erfolgt, da erst ab zwei Versuchsreihen ein, für die Bewertung benötigter, Mittelwert gebildet werden kann.

$$\underline{F}_{S_{ADGes}} = \frac{1}{\sum g_j} \sum_{j=1}^m (g_j \cdot \underline{F}_{S_{ADj}}) \quad (5.13)$$

g_j Gewichtungsfaktor für die Abweichungen bei Werkstoff j

5.2.2.2 Berechnungsvarianten

Die detaillierte Berücksichtigung des elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens führt zu einem deutlich komplexeren Festigkeitsnachweis, der zusätzliche Berechnungen und Werkstoffkennwerte voraussetzt. Dieser zusätzliche Aufwand kann in der Praxis nur mit deutlichen Verbesserungen der Treffsicherheit gerechtfertigt werden. Aus diesem Grund wird die Berechnung mit unterschiedlich detaillierter Betrachtung durchgeführt. Aufbauend auf den ermittelten Ergebnissen können im Anschluss, Berechnungsaufwand und Ergebnisqualitätsgewinn einander gegenübergestellt werden. Die in Tabelle 5.5 dargestellten Berechnungsansätze werden untersucht.

Die oben dargestellten Parameter, werden entweder nach [FKM 12] gewählt oder iterativ nach Abschnitt 5.2.2.1 an die experimentellen Ergebnisse angepasst. Die Anpassung erfolgt dabei für jeden Detaillierungsschritt separat.

Nach [FKM 12] existiert bei GJS Werkstoffen keine verformungsmechanische Stützwirkung. Eine verformungsmechanische Stützwirkung lässt sich jedoch nach Abschnitt 5.2.1 bestimmen. Um ihren Einfluss auf die Ergebnisqualität zu untersuchen, wird die Berechnung sowohl mit als auch ohne ihre Berücksichtigung durchgeführt. Die Bestimmung erfolgt hier auf Basis einer elastisch-plastischen Rechnung, da diese die verformungsmechanische Stützwirkung genauer beschreibt und sich somit evtl. Ungenauigkeiten in ihrer Bestimmung nicht auf die Ermittlung der anderen Parameter auswirken.

In [FKM 12] wird die statistische Stützwirkung auf Basis einer linear-elastischen Berechnung bestimmt. Das real vorliegende elastisch-plastische Werkstoffverhalten führt jedoch zu abweichenden hochbeanspruchten Bereichen, was nach [Liu 91a] berücksichtigt werden muss. Um den Einfluss zu

untersuchen, wird die Berechnung hier sowohl mit als auch ohne Berücksichtigung durchgeführt.

Ein Großteil der untersuchten Proben ist ungekerbt, weshalb in den Berechnungen zunächst von einer Formzahl von $K_t = 1$ ausgegangen wird. FE-Berechnungen zeigen jedoch, dass auch hier, wenn auch nur geringe, Spannungskonzentrationen auftreten, die in der Berechnung berücksichtigt werden müssen.

Die Berechnungsvarianten werden auf Basis der mittleren Abweichungen nach Gleichung (5.13) bewertet. Die mit (*) gekennzeichneten Berechnungsvarianten basieren rechnungsbedingt auf einer leicht abweichenden Datenbasis, weshalb die berechneten Abweichungen hier nicht direkt vergleichbar sind.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Parameteranpassung bereits bei sonst identischen Berechnungsansatz eine deutliche Verbesserung gegenüber [FKM 12] erzielt werden kann. Der Hauptunterschied liegt hier in der geringeren Schubempfindlichkeit, was durch den größeren Schubwechselfestigkeitsfaktor ausgedrückt wird. Der Weibull-Exponent ist ebenfalls etwas höher als nach [FKM 12] vorgegeben.

Tabelle 5.5: Untersuchte Berechnungsvarianten mit unterschiedlich detaillierter Betrachtung

Berechnungsvariante		Wahl der Parameter		Verformungsmechanische Stützwirkung	Statistische Stützwirkung auf Basis	Berücksichtigung von Span- nungskonzentrationen an ungekerbten Proben	Ergebnis der durchgeführten Parametervariation						
		Nach [FKM 12]	Iterativ angepasst				Nicht berücksichtigt	Mit FE bestimmt	Elastischer Rechnung	S _A basiert	S _O basiert	Weibull-Exponent k _{st}	Konstante b _M
1	✓			✗		✓				10	0,08	0,65	53,7
2			✓	✗		✓			✗	14	0,08	0,91	24,2
3			✓	✗		✓				14	0,07	0,89	24,2
4			✓		✓	✓			✗	17	0,07	0,86	21,6
5			✓		✓	✓				18	0,06	0,84	21,7
6			✓		✓		✓		✗	21	0,08	0,86	21,2
6*			✓		✓		✓		✗	23	0,05	0,88	18,3
7*			✓		✓			✓	✗	21	0,03	0,89	18,1
8*			✓		✓			✓		22	0,03	0,87	17,0

Die Berücksichtigung der Spannungskonzentrationen bei ungekerbten Proben hat hier zunächst nur geringe Auswirkungen. Eine Berücksichtigung wird aber aufgrund ihres Einflusses bei der Berechnung auf Basis der Zugfestigkeit trotzdem empfohlen.

Die Berücksichtigung der verformungsmechanischen Stützwirkung führt zu einer weiteren Verbesserung der Ergebnisqualität, weshalb ihre Berücksichtigung zu empfehlen ist. Ihre Berücksichtigung wirkt sich auf die Parameterbestimmung aus. Der Weibull-Exponent erhöht sich weiter und die Schubempfindlichkeit steigt leicht an.

Eine weitere, wenn auch zunächst eher geringe Verbesserung der Ergebnisqualität kann durch die Bestimmung des hochbeanspruchten Volumens auf Basis einer elastisch-plastischen Berechnung erzielt werden. Hierbei ergeben sich bessere Ergebnisse für die Berechnung des Volumens auf Basis der Oberspannungen als bei Berechnung auf Basis der Spannungsamplituden. Die eher geringe Verbesserung der Ergebnisqualität wird hier unter anderem auf die geometrische Ähnlichkeit der Proben zurückgeführt. Durch diese Ähnlichkeit kann der Einfluss der plastischen hochbeanspruchten Bereiche durch einen leicht abweichenden Weibull-Exponenten ausgeglichen werden. Die plastische Verformung führt im Fall der Biegung, im Vergleich zu axialen Belastungen, zu größeren hochbeanspruchten Volumen. Aus diesem Grund ergeben sich für den Weibull-Exponenten höhere Werte. Ein größerer Einfluss der Berechnung des hochbeanspruchten Volumens auf Basis einer elastisch-plastischen Berechnung ist für komplexere Bauteilgeometrien zu erwarten.

Für einen rechnerischen Betriebsfestigkeitsnachweis von ADI-Gussbauteilen wird hier die Berechnung nach Variante 5, Tabelle 5.5 empfohlen. Die verformungsmechanische Stützwirkung kann, wie in [FKM 12], auf Basis einer Neuber-Abschätzung bestimmt werden. Dies ist weniger genau, als die hier durchgeführten elastisch-plastischen Berechnungen, kann jedoch mit deutlich geringeren Berechnungsaufwand erfolgen.

Die Bestimmung der statistischen Stützzahl auf Basis des elastisch-plastisch berechneten, hochbeanspruchten Volumens führt zu einer weiteren Verbesserung der Ergebnisqualität. Dieser ist jedoch mit einem deutlich höheren Berechnungsaufwand und zusätzlich benötigten Werkstoffparametern verbunden.

5.2.3 Ansatz zur Bestimmung der Werkstoff-Wechselfestigkeit

Die Ergebnisse zeigen, dass der Ansatz der FKM-Richtlinie, die Wechselfestigkeit über einen linearen Faktor auf Basis der Zugfestigkeit abzuschätzen, insbesondere für hochfeste ADI-Werkstoffe, nicht zutreffend ist, vgl. Abschnitt 5.1.1. Die Ergebnisse zeigen, dass die Schwingfestigkeit mit steigender Zugfestigkeit ab ca. 1100 MPa nicht weiter ansteigt und für hochfeste ADI-Werkstoffe sogar wieder abfällt. Dieses Verhalten soll im Folgenden über einen quadratischen Ansatz abgebildet werden, Gleichung (5.14).

$$\sigma_{W,zd} = f_{W,\sigma,1} \cdot R_m - f_{W,\sigma,2} \cdot MPa \cdot \left(\frac{R_m}{MPa} \right)^2 \quad (5.14)$$

$f_{W,\sigma,1}$ Linearer Wechselfestigkeitsfaktor für ADI
 $f_{W,\sigma,2}$ Quadratischer Wechselfestigkeitsfaktor für ADI

Zur Bestimmung der Faktoren werden die Versuchsergebnisse der eigenen Versuche sowie die aus [Khal 05] genutzt. Die Datenbasis entspricht damit der aus der Parametervariation, vgl. Abschnitt 5.2.2.

Die experimentell bestimmten Wechselfestigkeiten werden zunächst, mit Hilfe der zuvor bestimmten Parameter, auf Werkstoff-Wechselfestigkeiten umgerechnet und anschließend über der Zugfestigkeit aufgetragen, Abbildung 5.6. Durch quadratische Interpolation ergeben sich die Faktoren nach Gleichung (5.14) zu:

$$\sigma_{W,zd} = 0,704 \cdot R_m - 2,99 \cdot 10^{-4} \cdot MPa \cdot \left(\frac{R_m}{MPa} \right)^2$$

Der Vergleich des quadratischen Ansatzes mit dem linearen Ansatz nach [FKM 12] zeigt, dass der quadratische Ansatz die Versuchsergebnisse besser wiedergibt. So können sowohl die Schwingfestigkeiten von hochfesten, als auch von ADI-Werkstoffen mit geringerer Festigkeit, besser wiedergegeben werden.

Ein für die praktische Anwendung einfacherer Ansatz, ist die Festlegung einer konstanten Werkstoff-Wechselfestigkeit, siehe konstanter Ansatz in Abbildung 5.6. Durch die Festsetzung der Werkstoff-Wechselfestigkeit auf 380 MPa wird die Überschätzung der Schwingfestigkeit bei hohen Zugfestigkeiten verhindert, gleichzeitig wird die Werkstoffausnutzung bei geringen Festigkeiten erhöht. Lediglich die leicht höheren Wechselfestigkeiten von ADI-Werkstoffen im mittleren Zugfestigkeitsbereich von ca. 1100 MPa können nicht vollständig ausgereizt werden.

Zu beachten ist, dass beide Ansätze nur in dem mit Ergebnissen belegten Bereich verwendet werden können. Dieser umfasst jedoch den Bereich, der in der Norm [DIN EN 1564] enthaltenen Werkstoffe im Zugfestigkeitsbereich von 800 bis 1400 MPa.

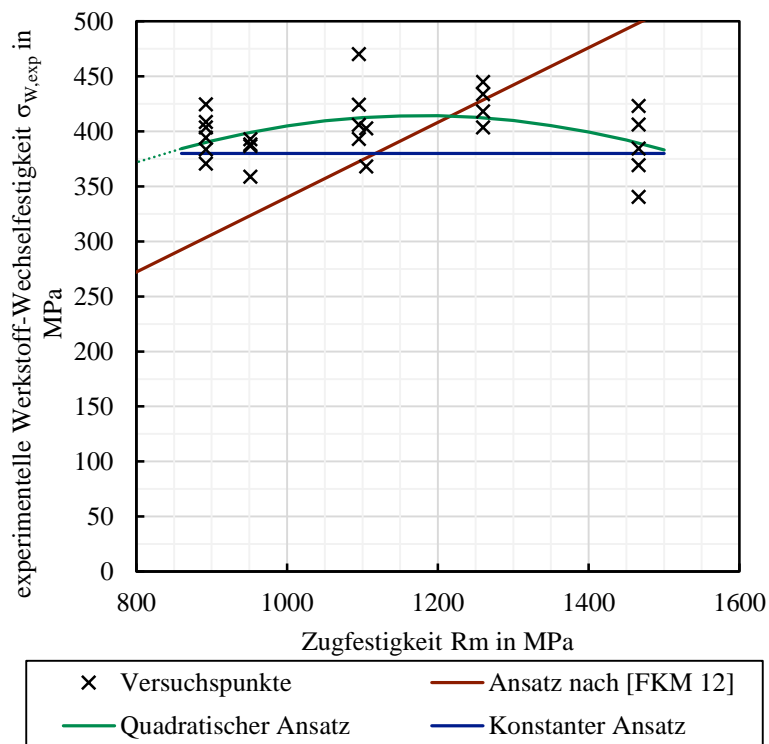


Abbildung 5.6: Werkstoff-Wechselspannung in Abhängigkeit der Zugfestigkeit.
Vergleich: Quadratischer Ansatz und linearer nach [FKM 12]

5.3 Vergleich der Ansätze zur Abschätzung der Langzeitfestigkeit

Die in den vorangegangenen Abschnitten bestimmten Anpassungen zur Verbesserung der Abschätzung der Bauteillangzeitfestigkeit werden im Folgenden der Berechnung nach [FKM 12] gegenübergestellt. Auf der Basis von Versuchsdaten werden die unterschiedlichen Berechnungsansätze bewertet. Dabei werden die folgenden drei Berechnungsansätze untersucht.

1. Berechnung nach FKM-Richtlinie [FKM 12]

Die Berechnung erfolgt nach [FKM 12] mit den in der Richtlinie für GJS gegebenen Parametern. Es werden die werkstoffmechanischen Stützzahlen genutzt, wobei die Bestimmung der statistischen Stützzahlen auf Basis der hochbeanspruchten Volumina erfolgt. Die hochbeanspruchten Volumina werden dabei nach der Methode SPIEL [Diem 04] bestimmt.

2. Berechnung auf Basis eines quadratischen Ansatzes

Die Grundlage der Berechnung bildet weiterhin [FKM 12]. Die verwendeten Parameter werden jedoch nach Tabelle 5.5 Berechnungsvariante 5 angepasst. Damit wird der Weibull-Exponent zu $k_{st} = 18$, der Schubwechselfestigkeitsfaktor zu $f_{w,\tau} = 0,84$ und die Konstante b_M zur Bestimmung der Mittelspannungsempfindlichkeit zu $b_M = 0,06$ gesetzt. Die verformungsmechanische Stützwirkung wird auf Basis des Ansatzes der FKM-Richtlinie bestimmt. Dazu wird die dauerfest ertragbare wechsellastische Dehnung zu $\varepsilon_{w,pl} = 1,0 \cdot 10^{-5}$ gesetzt und der Verfestigungsexponent n' nach Abschnitt 9.2 abgeschätzt. Eine weitere Änderung ist die Bestimmung der Werkstoff-Wechselfestigkeit auf Basis des quadratischen Ansatzes nach Abschnitt 5.2.3. Damit wird der Schwingfestigkeitsabfall bei hochfesten ADI-Werkstoffen abgebildet.

3. Berechnung auf Basis eines konstanten Ansatzes

Die dritte Berechnungsvariante stellt einen Weg zwischen den Berechnungsvarianten 1 und 2 da. Auf diesem Weg soll der Anpassungsbedarf zur Integration in die FKM-Richtlinie gering gehalten werden und gleichzeitig die Treffsicherheit gegenüber dem derzeitigen Stand der Richtlinie erhöht werden. Die Anpassung der Parameter erfolgt dabei für die Stützzahl sowie für den Schubwechselfestigkeitsfaktor wie in Berechnungsvariante 2. Die Mittelspannungsempfindlichkeit wird jedoch, aufgrund der nur geringfügigen Anpassung, wie in [FKM 12] bestimmt. Die Werkstoff-Wechselfestigkeit wird auf einen festen Wert von $\sigma_{w,zl} = 380 \text{ MPa}$ unabhängig von der Zugfestigkeit festgelegt, vgl. Abbildung 5.6.

Für die Gegenüberstellung der Berechnungen steht eine größere Datenbasis, als in Abschnitt 5.2.2 bei der Parametervariation zur Verfügung, da auch Literaturdaten genutzt werden können, deren Datenbasis und Dokumentation für die Parametervariation und die plastischen Berechnungen nicht ausreichend sind. Die Datenbasis enthält die Daten aus insgesamt 13 Quellen und 98 Versuchsreihen. Die Quellen unterscheiden sich dabei in Qualität und Umfang, Anhang 9.3.

In Abbildung 5.7 sind die experimentellen Ergebnisse der unterschiedlichen Quellen der Berechnung nach [FKM 12] gegenübergestellt. Es zeigt sich, wie auch bereits in Abschnitt 5.1.1, dass die Berechnung nach [FKM 12] mit steigender Zugfestigkeit unsicherer wird. In Abbildung 5.8 ist die gleiche Darstellung für die Berechnung nach Ansatz 2 gegeben. Der quadratische Ansatz führt hier zu einer besseren Bewertung der Werkstoffe mit hoher Zugfestigkeit. Die Darstellung für den Berechnungsansatz 3, Abbildung 5.9, zeigt vergleichbare Ergebnisse. Die Bewertung hochfester ADI-Werkstoffe kann auch hier deutlich verbessert werden.

In den Abbildungen 5.7 bis 5.9 sind die Ergebnisse der Quellen [Hanz 06], [Lin 96] und [Vech 06] in Rot dargestellt. Diese Daten stammen aus Untersuchungen unterschiedlicher Legierungszusammensetzungen und unterschiedlicher Wärmebehandlungsparameter. Auf Grund der Variation dieser Parameter sind die Werkstoffe bzw. die Wärmebehandlungsparameter hier oft nicht optimal eingestellt, was geringere Schwingfestigkeiten zur Folge hat.

Betrachtet man die abgeschätzten Streubreiten, Gleichung (5.15), der bezogenen Langzeitfestigkeiten für die verbleibenden Versuchsreihen, Tabelle 5.6, zeigt sich eine deutliche Verbesserung der Treffsicherheit durch die Anpassung der Berechnung.

$$T = \frac{90\% - \text{Quantil}}{10\% - \text{Quantil}} \quad (5.15)$$

Tabelle 5.6: Mittelwerte und Streuungen der bezogenen Langzeitfestigkeiten für die Berechnungsansätze

Berechnung	Bezogene Langzeitfestigkeit	
	Mittelwert	Streubreite
Nach [FKM 12]	1,08	1,81
auf Basis des quadratischen Ansatzes	1,03	1,42
auf Basis des konstanten Ansatzes	0,97	1,43

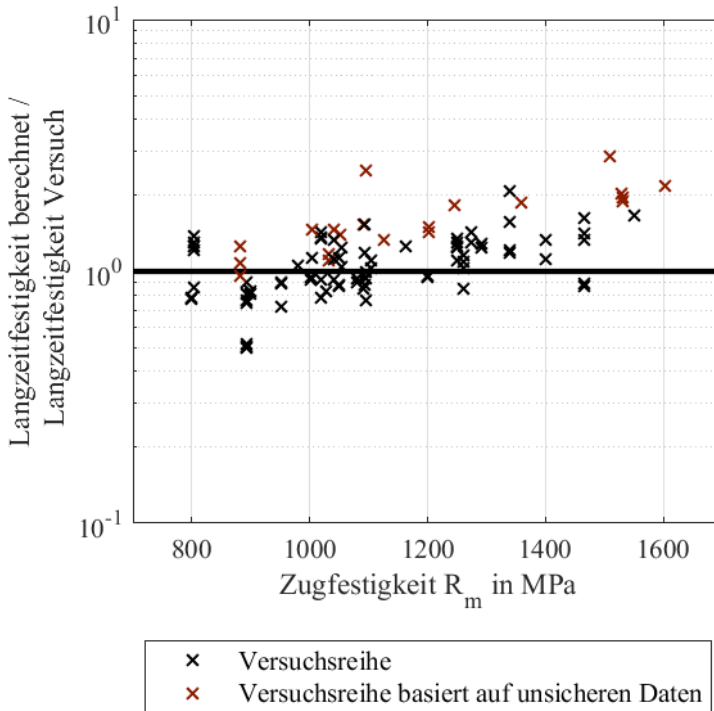


Abbildung 5.7: Gegenüberstellung der berechneten und der experimentellen Langzeitfestigkeit in Abhängigkeit der Zugfestigkeit. Berechnung nach [FKM 12]

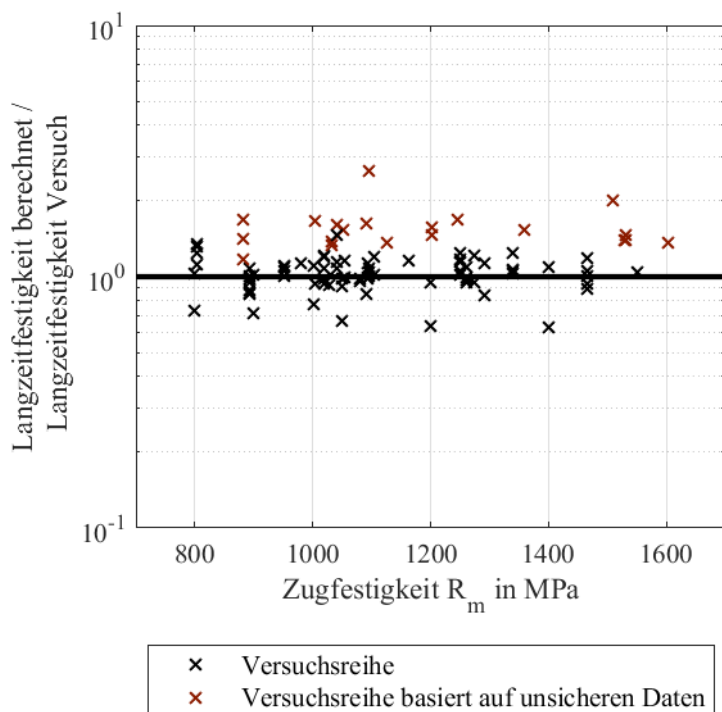


Abbildung 5.8: Gegenüberstellung der berechneten und der experimentellen Langzeitfestigkeit in Abhängigkeit der Zugfestigkeit. Berechnung mit quadratischem Ansatz und angepassten Parametern

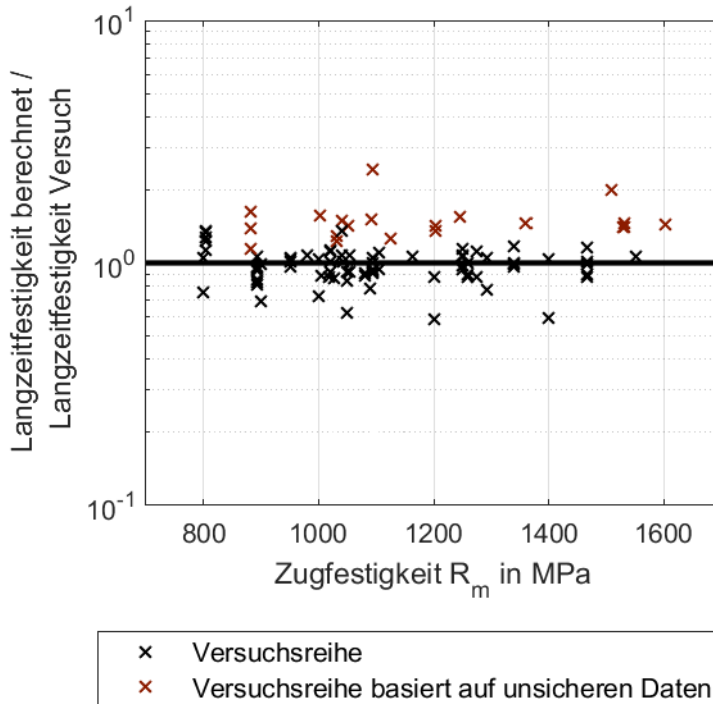


Abbildung 5.9: Gegenüberstellung der berechneten und der experimentellen Langzeitfestigkeit in Abhängigkeit der Zugfestigkeit. Berechnung mit konstantem Ansatz für die Werkstoff-Wechselhaftigkeit

In Abbildung 5.10 sind die Verhältnisse der berechneten Langzeitfestigkeiten zu den im Versuch bestimmten Langzeitfestigkeiten für die Versuche unter Torsion- bzw. Schubbelastung dargestellt. Zur besseren Einordnung der Ergebnisse sind die Verhältnisse auch für Biegeuntersuchungen an den jeweiligen Werkstoffen dargestellt. Es zeigt sich, dass durch die Anpassungen der Berechnungsparameter, die Abweichungen zwischen Biege- und Torsionsversuchen verringert werden. Hier ist dabei nur die Anpassung nach Berechnungsvariante 2 dargestellt, da die hier entscheidenden Parameter bei Variante 3 identisch gewählt sind und sich damit ein vergleichbares Bild ergibt. Nach [FKM 12] werden die Langzeitfestigkeiten unter Schubbeanspruchung unterschätzt. Durch die vorgenommenen Anpassungen liegen die Ergebnisse für Schub nun im Streubereich der Ergebnisse unter Normalbeanspruchung. Somit kann die Bewertung von schubbelasteten Bauteilen durch die vorgenommenen

Anpassungen verbessert werden, und damit das Potential von ADI besser ausgenutzt werden.

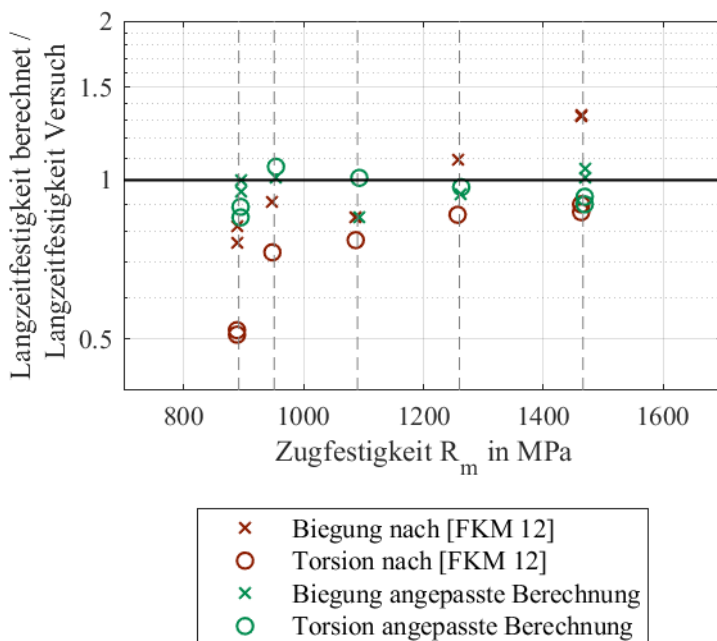


Abbildung 5.10: Vergleich der Berechnung unter Schubbeanspruchung nach [FKM 12] und mit angepasster Berechnung

In Abbildung 5.11, Abbildung 5.12 und Abbildung 5.13 sind in den Gegenüberstellungen der Ergebnisse die unterschiedlichen Belastungsarten farblich markiert. Dabei sind die Daten von gekerbten Proben nicht dargestellt. Wie schon in Abbildung 5.10 zu erkennen, kann insbesondere die Treffsicherheit bei den Torsionsversuchen durch die Anpassung der Parameter (hier insbesondere des Schubwechselfestigkeitsfaktors) verbessert werden. Bei den beiden Varianten mit der angepassten Berechnung liegen die unterschiedlichen Belastungsarten grundsätzlich im selben Streuband. Dies ist ein Zeichen für eine gute Bewertung der unterschiedlichen Belastungsarten.

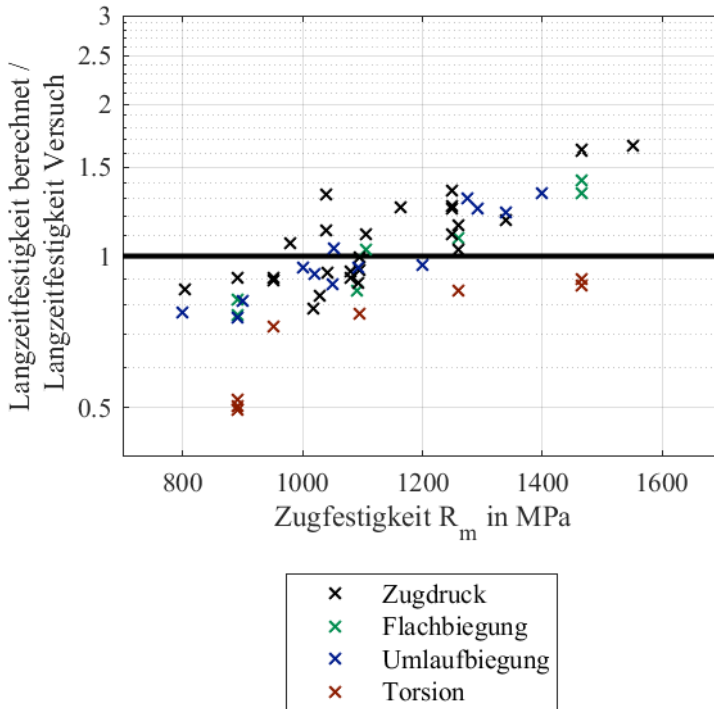


Abbildung 5.11: Gegenüberstellung der berechneten und der experimentellen Langzeitfestigkeit in Abhängigkeit der Belastungsart. Berechnung nach [FKM 12].

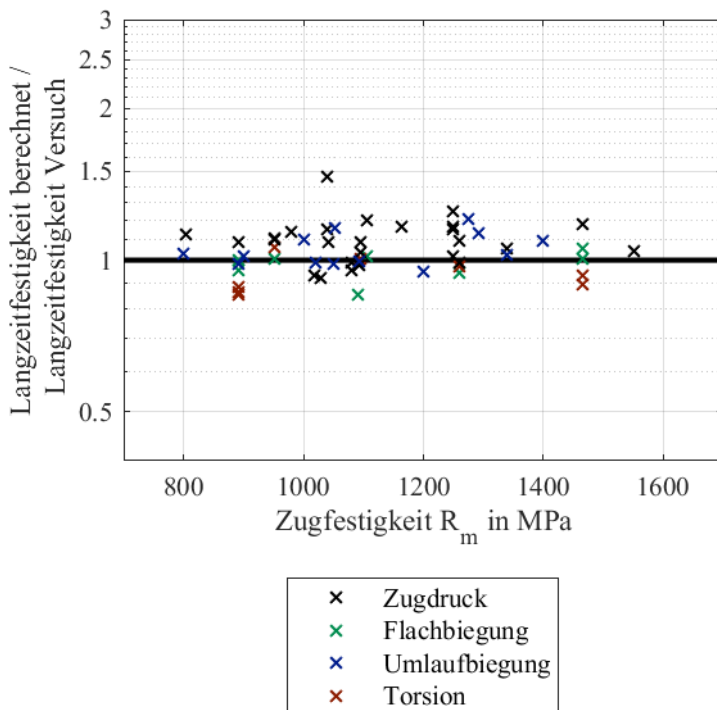


Abbildung 5.12: Gegenüberstellung der berechneten und der experimentellen Langzeitfestigkeit in Abhängigkeit der Belastungsart. Berechnung mit quadratischem Ansatz und angepassten Parametern.

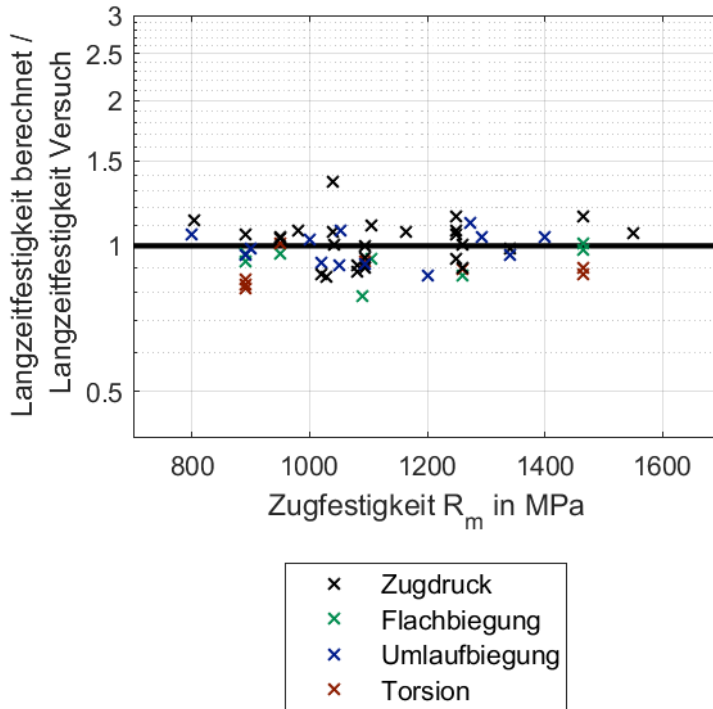


Abbildung 5.13: Gegenüberstellung der berechneten und der experimentellen Langzeitfestigkeit in Abhängigkeit der Belastungsart. Berechnung mit konstantem Ansatz für die Werkstoff-Wechselselfestigkeit

5.4 Gekerbte Proben

Im Gegensatz zu den in dieser Arbeit untersuchten ungekerbten Versuchsproben, ist die Geometrie von ausgeführten Bauteilen zumeist gekerbt, was zu lokalen Spannungsüberhöhungen führt. In der Literatur sind einige Ergebnisse für gekerbte Proben zu finden, [Chap 06], [Din 1564], [Gilb 86], [Lea 11], [Lin 98] und [Schö 15]. In Abbildung 5.14 ist die Anwendung der an ungekerbten Proben bestimmten, angepassten Berechnung der Anwendung der FKM-Richtlinie [FKM 12] auf gekerbte Proben gegenübergestellt. Eine Kerbbewertungsgüte von $G_{\text{Kerb}} = 1$ entspricht dabei einer gleich großen Abweichung zwischen Berechnung und Versuch bei der gekerbten Probe wie bei einer ungekerbten Vergleichsprobe, Gleichung (5.16). Werte größer eins entsprechen einer Überschätzung der Schwingfestigkeit der gekerbten Probe im Vergleich zur ungekerbten Vergleichsprobe.

$$G_{\text{Kerb}} = \frac{\sigma_{\text{AD,Berechnet,Kerb}} / \sigma_{\text{AD,Versuch,Kerb}}}{\sigma_{\text{AD,Berechnet,Kerb}} / \sigma_{\text{AD,Versuch,Kerb}}} \quad (5.16)$$

Die Ergebnisse aus [Din 1564] und [Gilb 86] sind hier weniger kräftig dargestellt. Diese Ergebnisse stammen, soweit nachvollziehbar, aus der gleichen Untersuchungsreihe an stark gekerbten Proben. Der Kerbradius ist hier mit $R = 0,25$ mm angegeben. Eine solch scharfe Kerbe ist mit einer sehr aufwendigen Fertigung verbunden, und schon geringe Abweichungen führen zu einer deutlich abweichenden Kerbwirkung. So könnten die Abweichungen in Abbildung 5.14 bereits durch einen um 0,1 mm größeren Kerbradius nahezu vollständig erklärt werden.

Abbildung 5.14 zeigt, dass durch die auf Basis von ungekerbten Proben angepasste Berechnung die Bewertung von gekerbten Proben (grün) schon deutlich im Vergleich zur [FKM 12] (rot) verbessert werden kann. Besonders deutlich ist die Verbesserung, wenn die Ergebnisse aus [Din 1564] und [Gilb 86] in der Betrachtung nicht berücksichtigt werden. Trotzdem führt auch hier die Berechnung noch zu einer leichten Überschätzung der Schwingfestigkeit gekerbter Proben. Eine Abhängigkeit von der Zugfestigkeit ist dabei nicht zu erkennen. Bei der Anpassung wird hier nicht zwischen der Berechnungsvariante 2 und 3 unterschieden, da für beide Varianten die Bestimmung der Stützzahlen identisch ist.

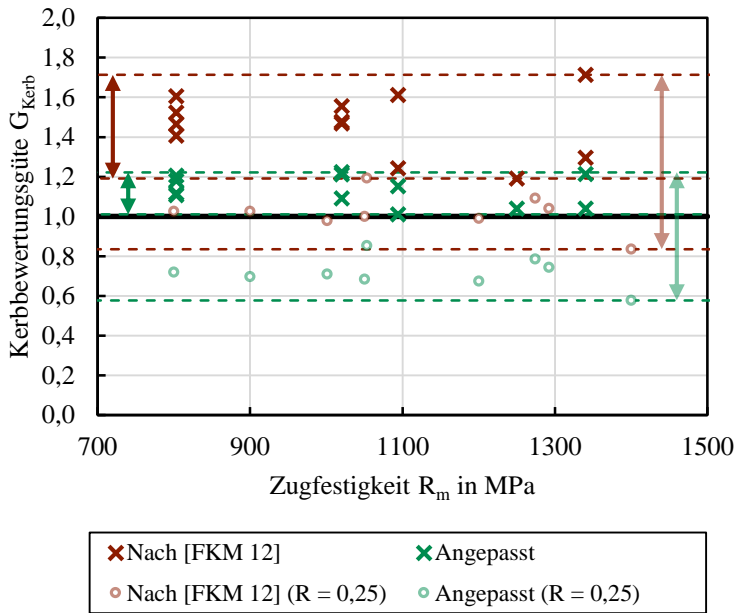


Abbildung 5.14: Vergleich der Bewertung von Kerben nach [FKM 12] der Bewertung mit angepasster Berechnung über der Zugfestigkeit

In Abbildung 5.15 ist die Kerbbewertung in Abhängigkeit von der Formzahl dargestellt. Auch hier ist keine deutliche Abhängigkeit zu erkennen.

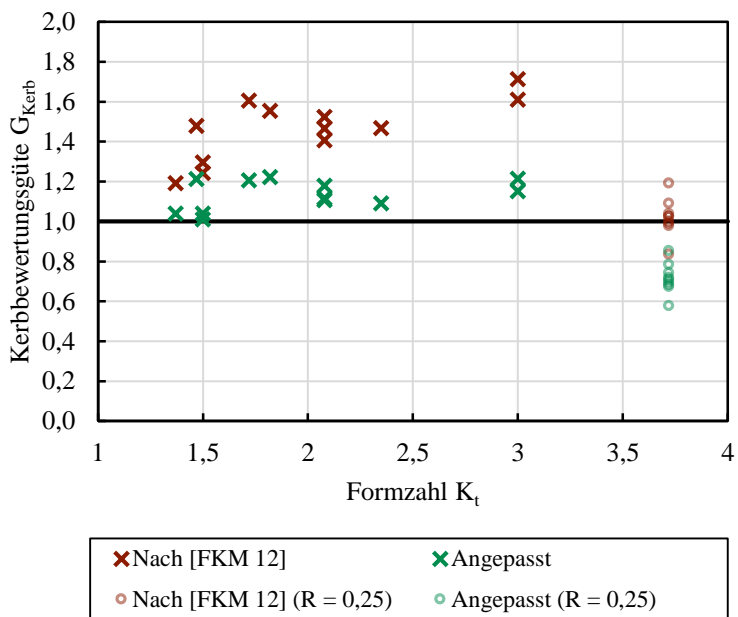


Abbildung 5.15: Bewertung von Kerben nach [FKM 12] und mit angepasster Berechnung über der Formzahl

5.5 Rechnerische Abschätzung von Wöhlerlinien

Für die Auslegung von Bauteilen werden Wöhlerlinien benötigt. Um diese experimentell zu bestimmen, müssen eine Vielzahl von Versuchen durchgeführt werden, was zeitaufwendig und teuer ist. Aus diesem Grund wird in der Praxis oft auf rechnerisch abgeschätzte Wöhlerlinien zurückgegriffen. Eine oft verwendete Möglichkeit zur Konstruktion von Wöhlerlinien stellt die Methode aus [FKM 12] dar. Hier wird zunächst, aufbauend auf der Zugfestigkeit, die Langzeitfestigkeit für 10^6 Lastwechsel bestimmt, vgl. Abschnitt 3.4. Sie stellt den Knick- und Aufhängepunkt der Wöhlerlinie dar. Im Zeitfestigkeitsbereich wird eine konstante Neigung von $k = 5$ für nicht geschweißte Bauteile unter Normalbeanspruchung angenommen ($k = 8$ für Schub). Im Langzeit- bzw. Dauerfestigkeitsbereich wird für Stahl und Eisengusswerkstoffe von einem konstanten Verlauf der Wöhlerlinie ausgegangen. Zusätzlich ist ein Wöhlerlinientyp II für Aluminiumwerkstoffe und austenitischen Stahl gegeben. Hier wird im Bereich zwischen 10^6 und 10^8 Lastwechseln eine Wöhlerlinienneigung von $k^* = 15$ ($k^* = 25$ für Schub) angenommen und erst im Anschluss ein konstanter Verlauf. Für GJS ist dieser Wöhlerlinientyp nach [FKM 12] nicht vorgesehen. Die Ergebnisse aus Abschnitt 4.5.2. zeigen jedoch einen Abfall der Schwingfestigkeit im Bereich der Langzeitfestigkeit. Für eine Anwendung des Wöhlerlinientyp II für ADI spricht außerdem, dass durch die Wärmebehandlung entstandene Ausferrit, welches zu Teilen aus Austenit besteht. Damit ist eine gewisse Verwandtschaft zu austenitischen Stählen vorhanden, für die der Typ II angewendet wird.

Im Folgenden werden drei Varianten zur rechnerischen Abschätzung von Wöhlerlinien miteinander verglichen. Die Methoden bauen dabei jeweils auf einer der drei Berechnungsvarianten nach Abschnitt 5.3 auf.

1. Berechnung nach [FKM 12]:

Bei der ersten Variante erfolgt die Abschätzung der Wöhlerlinie nach [FKM 12]. Die Bestimmung der Langzeitfestigkeit entspricht hier Berechnungsvariante 1 nach Abschnitt 5.3. Die Wöhlerlinienneigung im Zeitfestigkeitsbereich beträgt $k = 5$ für Normalspannungen bzw. $k = 8$ für Schubspannungen. Im Langzeitfestigkeitsbereich wird ein konstanter Verlauf der Wöhlerlinie angenommen.

2. Berechnung auf Basis des quadratischen Ansatzes:

Bei der zweiten Variante erfolgt die Abschätzung der Langzeitfestigkeit entsprechend der Berechnungsvariante 2 nach Abschnitt 5.3. Für den Zeitfestigkeitsbereich wird eine Wöhlerlinienneigung von $k = 8$ (vgl. Abschnitt 4.5.1) und für den Langzeitfestigkeitsbereich eine Wöhlerlinienneigung von $k^* = 25$ (vgl. Abschnitt 4.5.2) angenommen. Diese Variante entspricht der, für

diese Arbeit, größten Anpassung der Berechnung an die experimentellen Ergebnisse.

3. Berechnung auf Basis des konstanten Ansatzes:

Die dritte Variante zeigt eine Möglichkeit auf, die Ergebnisse der Untersuchungen mit geringem Aufwand in die FKM-Richtlinie [FKM 12] zu integrieren. Die Langzeitfestigkeit wird hier nach Berechnungsvariante 3 Abschnitt 5.3 bestimmt. Die Wöhlerlinie wird anschließend entsprechend Wöhlerlinientyp II nach [FKM 12] konstruiert. Damit liegt die Wöhlerlinienneigung im Zeitfestigkeitsbereich für Normalspannung bei $k = 5$ bzw. $k = 8$ für Schubspannungen und im Bereich von 10^6 bis 10^8 Lastwechsel für Normalspannungen bei $k^* = 15$ bzw. für Schubspannungen bei $k^* = 25$.

In Abbildung 5.16 und Abbildung 5.17 sind die experimentellen Versuchsergebnisse der Flachbiegeversuche den rechnerischen Wöhlerlinien gegenübergestellt. Die Berechnung erfolgt auf Basis der experimentellen Zugfestigkeiten, womit die Wöhlerlinien nach [FKM 12] für 50 % Ausfallwahrscheinlichkeit gültig sind. Die Wöhlerlinien nach [FKM 12], in grau und rot dargestellt, sind beim GJS 800-8 deutlich auf der konservativen Seite, liegen jedoch im Fall des GJS 1400-1 auf der unsicheren Seite. Auf Basis des quadratischen Ansatzes liegen die Wöhlerlinien für beide Werkstoffe im Streubereich der experimentell ermittelten Versuchspunkte und geben sie damit gut wieder. Die Berechnung mit dem konstanten Ansatz trifft die experimentellen Ergebnisse ebenfalls deutlich besser als die Berechnung nach [FKM 12].

Für die torsionsbelasteten Proben ergeben sich im Versuch deutlich abweichende Wöhlerlinienneigungen. So verlaufen die ermittelten Wöhlerlinien für Torsion beim GJS 800-8 flacher und beim GJS 1400-1 steiler als der gemittelte Wert von $k = 8$ für Normalbeanspruchungen, Abschnitt 4.5.1. Auch die FKM-Richtlinie nimmt für Schubbeanspruchungen eine Wöhlerlinienneigung von $k = 8$ an. Die Gegenüberstellung der experimentellen Versuchsergebnisse mit den rechnerischen Wöhlerlinien zeigt jedoch trotzdem eine gute Übereinstimmung, Abbildung 5.18 und Abbildung 5.19. Dabei gibt die Berechnung auf Basis des quadratischen Ansatzes die experimentellen Versuchsergebnisse jeweils am besten wieder, aber auch der konstante Ansatz führt zu deutlich besseren Ergebnissen, als die ursprüngliche Berechnung nach [FKM 12]. Abweichungen in der Neigung der Wöhlerlinien können dabei zum Teil durch ebenfalls abweichende Knickpunkte kompensiert werden.

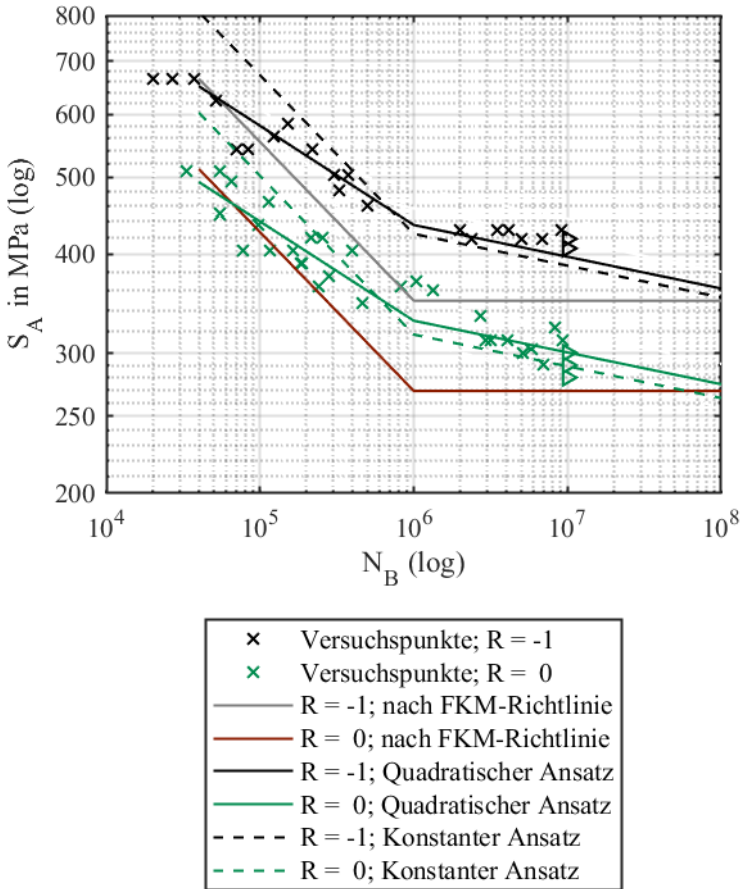


Abbildung 5.16: Gegenüberstellung von experimenteller und abgeschätzter Wöhlerlinien für den Werkstoff GJS 800-8 unter Flachbiegebelastung.

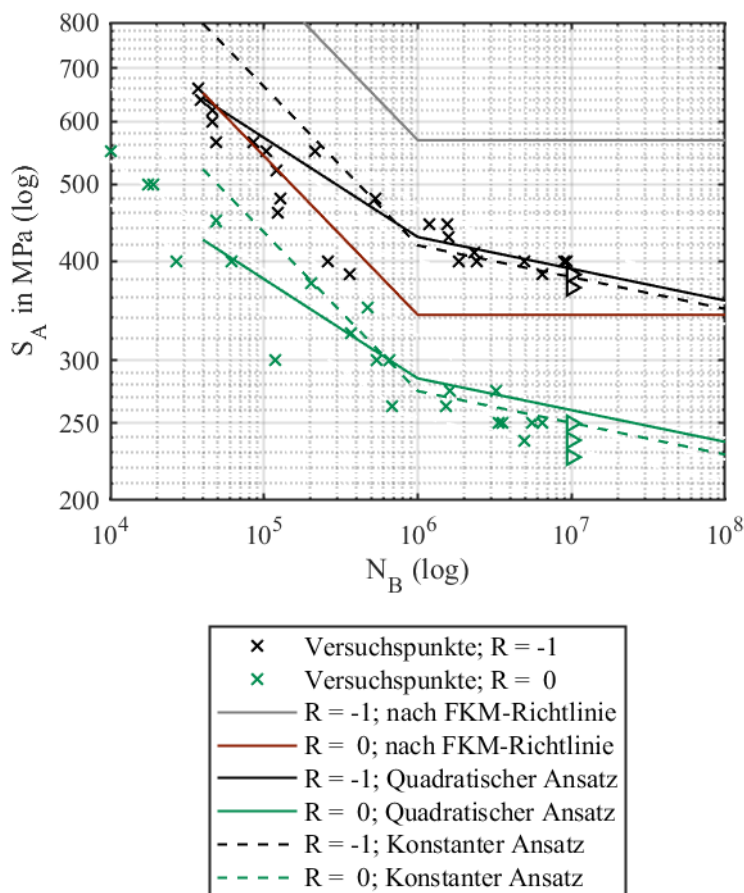


Abbildung 5.17: Gegenüberstellung von experimenteller und abgeschätzter Wöhlerlinien für den Werkstoff GJS 1400-1 unter Flachbiegebelastung.

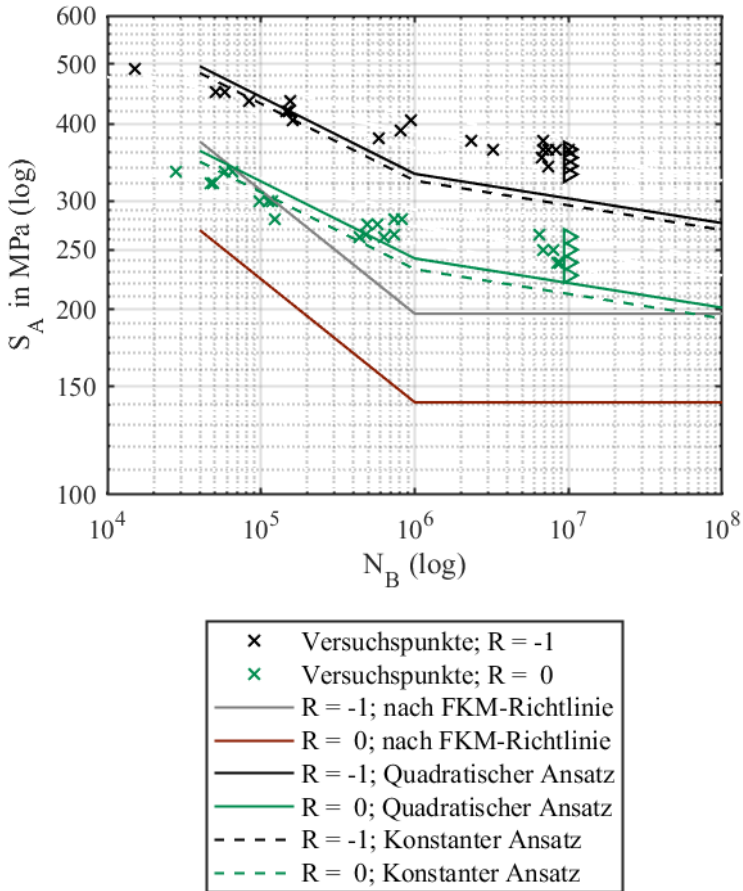


Abbildung 5.18: Gegenüberstellung von experimenteller und abgeschätzter Wöhlerlinien für den Werkstoff GJS 800-8 unter Torsionsbelastung.

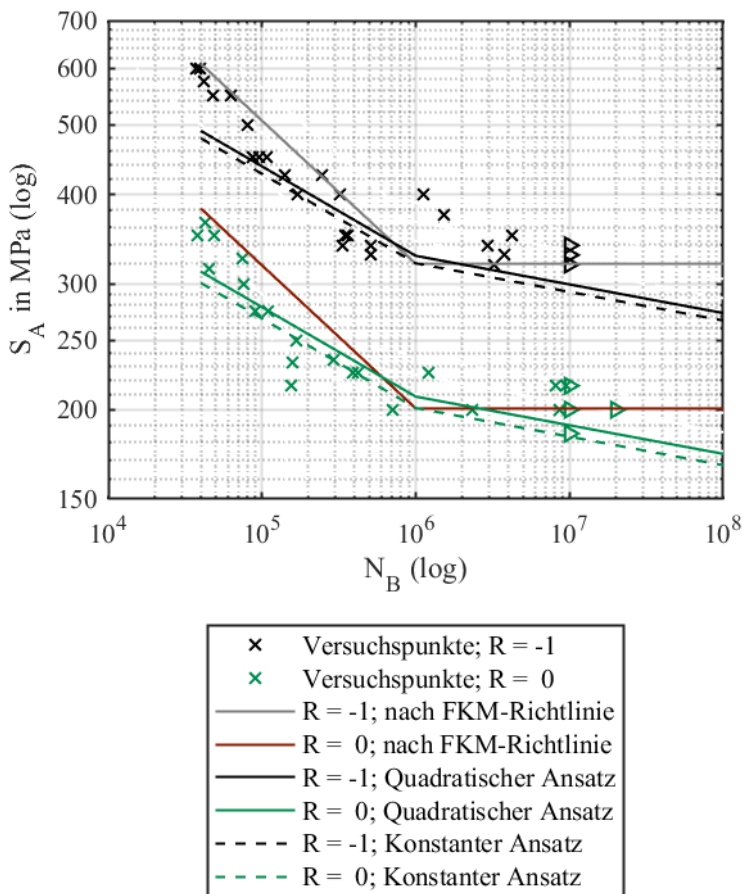


Abbildung 5.19: Gegenüberstellung von experimenteller und abgeschätzter Wöhlerlinien für den Werkstoff GJS 1400-1 unter Torsionsbelastung.

Die oben durchgeführte Gegenüberstellung der drei unterschiedlichen Berechnungsvarianten durch die Betrachtung der Wöhlerlinien zeigt schon erste Tendenzen für die Bewertung der unterschiedlichen Verfahren. Für die gesamte Datenbasis ist eine solche Bewertung jedoch schwierig, da sie keine quantitative Bewertung der konstruierten Wöhlerlinien zulässt. Um eine solche Bewertung zu ermöglichen, werden im Folgenden die auf Basis der unterschiedlich konstruierten Wöhlerlinien bestimmten Festigkeiten den experimentellen

Festigkeiten gegenübergestellt. Der Vergleich erfolgt hier in Richtung der Festigkeit, da die FKM-Richtlinie, auf der die Berechnungen beruhen, Sicherheiten ebenfalls in Festigkeitsrichtung berücksichtigt.

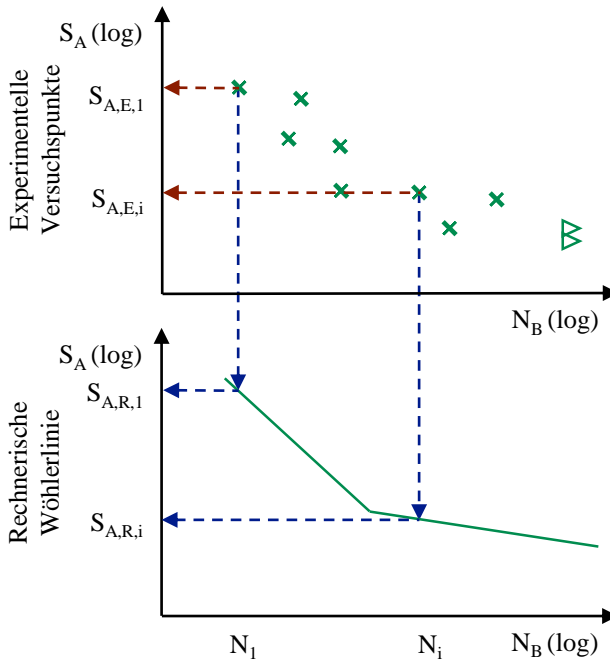


Abbildung 5.20: Bestimmung rechnerischer Festigkeiten zum Vergleich mit experimentellen Versuchsergebnissen

Für die Gegenüberstellung werden für die Einzelversuchsergebnisse, für die Spannungsamplituden und Lastwechselzahlen vorliegen, die rechnerisch ertragbaren Spannungsamplituden für die jeweiligen Lastwechselzahlen bestimmt, vgl. Abbildung 5.20. Die Spannungsamplituden werden anschließend zueinander ins Verhältnis gesetzt. Unter der Annahme, dass diese logarithmisch Normalverteilt sind, wird anschließend für die einzelnen Versuchsreihen jeweils der logarithmische Mittelwert sowie die logarithmische Standardabweichung bestimmt. Dazu wird ein Algorithmus auf Basis der „Maximum-Likelihood“-Methode genutzt, um auch Durchläufer in der Berechnung berücksichtigen zu können. Die sich daraus ergebenden Mittelwerte und Streubreiten für die einzelnen Versuchsreihen sind in Abbildung 5.21 dargestellt. Tabelle 5.8 gibt eine Zuordnung der bewerteten Versuchsreihen zu den einzelnen Quellen. Zusätzlich ist der Mittelwert der Mittelwerte der Einzelversuchsreihen M sowie dessen

Streubreite T_M gegeben. Für die Gesamtstreubreite T werden die Abweichungen aller Einzelversuchsergebnisse berücksichtigt. Die dazugehörigen Werte sind in Tabelle 5.7 gegeben. Zusätzlich ist dort die mittlere Streubreite der Einzelversuchsergebnisse für die einzelnen Versuchsreihen gegeben.

Es zeigt sich, dass die Berechnungsvariante basierend auf dem quadratischen Ansatz zur Bestimmung der Werkstoff-Wechselfestigkeit die experimentellen Versuchsergebnisse am besten wiedergibt. So ist bei dieser Variante die Streuung der Mittelwerte, aber auch die Streuung bei den Einzelversuchsergebnissen am geringsten. Aber auch die Berechnung auf Basis der konstanten Werkstoff-Wechselfestigkeiten zeigen deutliche Verbesserungen in der Treffsicherheit im Vergleich mit dem derzeitigen Stand der FKM-Richtlinie.

Die experimentellen Versuchsergebnisse wurden nicht alle an Proben mit optimaler Werkstoffqualität ermittelt. Insgesamt können jedoch alle Versuchsreihen relativ gut mit den angepassten Berechnungen dargestellt werden. Jedoch muss trotzdem eine hohe Werkstoffqualität sichergestellt werden, da Abweichungen z.B. durch enthaltene Carbide, Martensit oder unvollständige Umwandlungen die Schwingfestigkeit zum Teil deutlich reduzieren können, [Lin 96], [LEA 11].

Tabelle 5.7: Bewertung der Treffsicherheit unterschiedlichen Berechnungsverfahren

	Berechnung nach FKM-Richtlinie	Angepasste Berechnung (quadratisch)	Angepasste Berechnung (konstant)
Mittelwert der Mittelwerte	1,04	1,01	0,94
Streubreite der Mittelwerte	1,77	1,34	1,35
Mittlere Streubreite Einzelversuchsergebnisse	1,44	1,27	1,38
Gesamt Streubreite	2,28	1,51	1,70

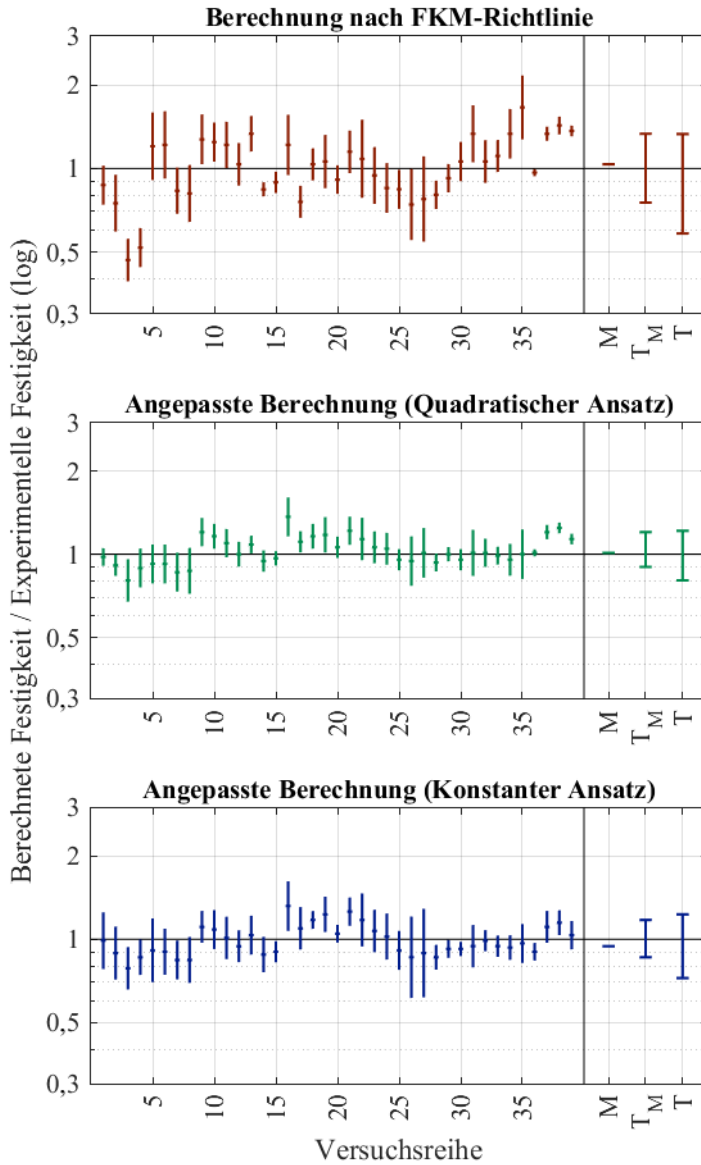


Abbildung 5.21: Gegenüberstellung von experimentell ermittelten Versuchspunkten und rechnerischen Wöhlerlinien

Tabelle 5.8: Zuordnung der Versuchsreihen für die Gegenüberstellung von Experiment und Versuch

Nr.	Quelle	Werkstoff	Belastungsart	Belastungs- verhältnis	Kerbe		
1	Eigene Versuche	GJS 800-8 R _m =892 MPa	Flachbiegung	R = -1	K _t ≈ 1		
2				R = 0			
3			Torsion	R = -1			
4				R = 0			
5		GJS 1400-1 R _m =1466 MPa	Flachbiegung	R = -1			
6				R = 0			
7			Torsion	R = -1			
8				R = 0			
9	[LEA 11]	ADI 1200 R _m ≈1200 MPa	Zugdruck	R = -1	K _t ≈ 1		
10							
11							
12							
13		ADI 1000 R _m ≈1080 MPa R _m ≈1040 MPa			K _t = 1,4		
14					K _t ≈ 1		
15							
16							
17	[Schö 15]	MADI R _m =803 MPa	Zugdruck	R = 0	K _t ≈ 1		
18				K _t = 2,1			
19					R = -1		
20					R = 0,5		
21		Flachbiegung	R = 0	K _t = 1,7			
22	[Zapl 08]	ADI R _m =967 MPa	Zugdruck	R = -1	K _t ≈ 1		
23	[Wohl 10]	ADI R _m ≈1000 MPa	Umlaufbiegung	R = -1	K _t ≈ 1		
24	[Baue 05]	GJS 900-6 R _m =977 MPa	Flachbiegung	R = -1	K _t ≈ 1		
25	[Wohl 11]	ADI 1000 R _m =1028 MPa R _m =1019 MPa R _m =1042 MPa	Umlaufbiegung	R = -1	K _t ≈ 1		
26							
27							
28	[Lin 98]	ADI R _m =1094 MPa	Zugdruck	R = -1	K _t ≈ 1		
29			Umlaufbiegung				
30					K _t = 1,5		
31					K _t = 3,0		
32		ADI	Zugdruck		K _t ≈ 1		

33		$R_m=1340 \text{ MPa}$	Umlaufbiegung		
34					$K_t = 1,5$
35					$K_t = 3,0$
36	[Chap 06]	Grade 2 $R_m=1020 \text{ MPa}$	Umlaufbiegung	$R = -1$	$K_t \approx 1$
37					$K_t = 1,5$
38					$K_t = 1,8$
39					$K_t = 2,4$

5.6 Sicherheitskonzept

Die Berechnungen in der FKM-Richtlinie beruhen auf Zugfestigkeitskennwerten mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 97,5 %. Für die hier durchgeführten Untersuchungen wurden die mittleren Zugfestigkeiten genutzt, da ein Vergleich mit experimentell ermittelten Wöhlerlinien für eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 50 % durchgeführt wurde. Für die Berechnung in der Praxis sind jedoch 97,5 % Werte anzusetzen, um die erforderliche Bauteilsicherheit zu gewährleisten. Da für die untersuchten Werkstoffe größtenteils nur Mittelwerte für die Zugfestigkeiten vorliegen, wird im Folgenden eine abgeschätzte Standardabweichung für die Zugfestigkeiten genutzt. In den selbst durchgeführten Zugversuchen ergeben sich aufbauend auf je 21 Einzelversuchen Standardabweichungen für die Zugfestigkeit von ca. 3 – 4 %. Mit dem Quantil für eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 97,5 % ergibt sich damit eine mittlere Reduktion der Zugfestigkeit von 7 % für die Ausfallwahrscheinlichkeit von 97,5 %. Diese Abschätzung ist nicht übertragbar für die Auslegung von Bauteilen, da dort zusätzliche Chargeneinflüsse und ähnliches berücksichtigt werden muss.

Zusätzlich wird in der FKM-Richtlinie [FKM 12] ein Sicherheitsfaktor j_D genutzt, der in Abhängigkeit von der Lastannahme, dem Werkstoff und der Schadensfolge gewählt wird. Zusätzlich kann der Temperaturbereich berücksichtigt werden, was hier jedoch, aufgrund der Versuchsdurchführung bei Raumtemperatur, nicht geschieht.

$$j_D = j_S \cdot j_F \cdot j_G \quad (5.17)$$

Der Lastsicherheitsfaktor wird hier zu $j_S = 1,0$ gesetzt, da die Last im Versuch aufgrund der Vorgabe am Prüfstand bekannt ist. Für die Schadensfolge wird hier zunächst ebenfalls der geringste Sicherheitsfaktor gewählt. Dies entspricht nach [FKM 12] $j_F = 1,2$. Zusätzlich ist ein Gussicherheitsfaktor in der Richtlinie enthalten, der Gussfehler berücksichtigt. Hier wird zunächst von Premiumguss und damit einem Sicherheitsfaktor von $j_G = 1,0$ ausgegangen.

Wird der Faktor aus der Zugfestigkeitsbestimmung und der Sicherheitsfaktor in der Berechnung berücksichtigt, ergibt sich Abbildung 5.22. Hierbei sind jedoch nicht wie in Abbildung 5.21 die Streubreiten eingetragen, sondern die Bereiche von 2,5 bis 97,5 % Ausfallwahrscheinlichkeit (basierend auf den ermittelten Standardabweichungen). Diese Einteilung wird gewählt, da die FKM-Richtlinie für eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 97,5 % Gültigkeit besitzt [FKM 12].

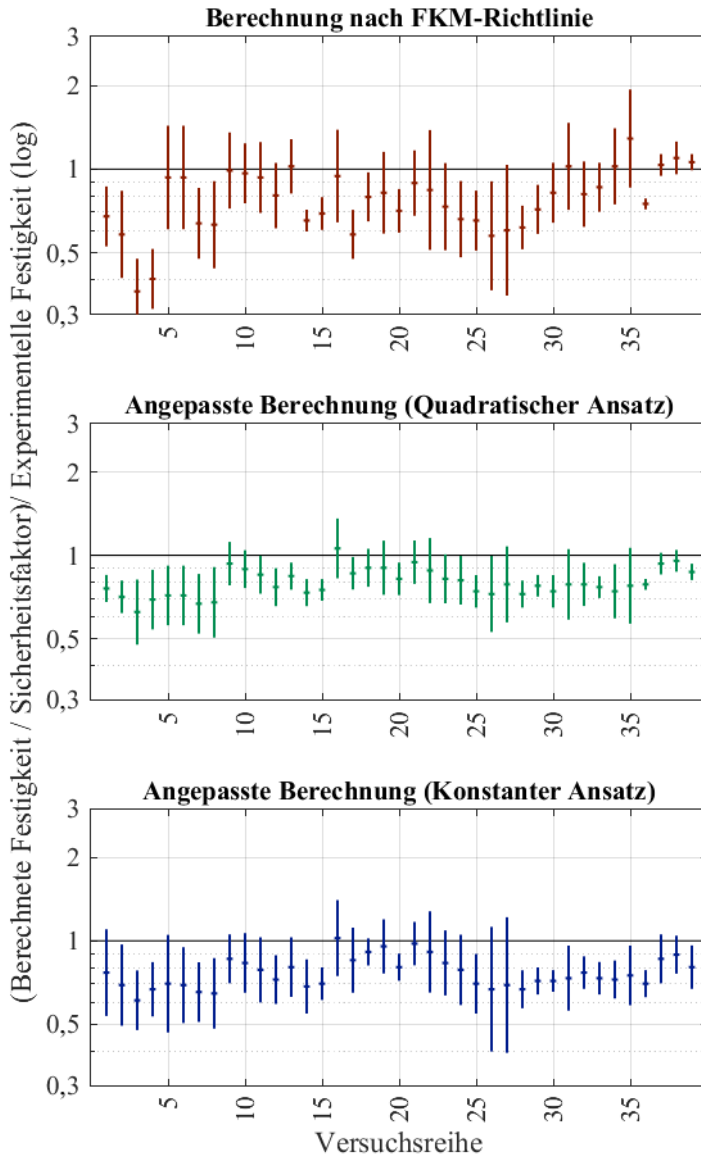


Abbildung 5.22: Gegenüberstellung von experimentell ermittelten Versuchspunkten und rechnerischen Wöhlerlinien unter Berücksichtigung des kleinsten Sicherheitsfaktors nach [FKM 12]

Der Vergleich der einzelnen Versuchsreihen zeigt, dass bei der Berechnung nach [FKM 12] unter Berücksichtigung der Sicherheitsfaktoren noch viele Versuchsreihen nicht im konservativen Bereich liegen. Für die beiden verbesserten Ansätze liegen jedoch die meisten Versuchsreihen mit ihrem Streubereich auf der sicheren Seite. Nur einzelne Versuchsreihen weichen hier ab.

Eine genauere Betrachtung der Versuchsreihen, die nicht die geforderte Sicherheit aufweisen, zeigt, dass hier die Werkstoffqualität nicht den Anforderungen eines ADI-Werkstoffs genügen. Die Versuchsreihen 9 bis 16 stammen aus dem Projekt LEA [LEA 11]. Hier zeigte sich bereits im vorliegenden Bericht, dass die Wärmebehandlung nicht immer erfolgreich verlaufen ist. Insbesondere bei Versuchsreihe 16 konnte kein ADI-Gefüge eingestellt werden. Auch bei anderen Werkstoffen aus [LEA 11] wird eine vollständige ADI-Umwandlung angezweifelt. Ein Hinweis ist dabei unter anderem, die in [LEA 11] genannte starke Streuung im Zugversuch. Ebenfalls sehr nah am unsicheren Bereich liegen die Versuchsreihen 17 bis 21, diese entstammen der Arbeit [Schö 15]. Mit einer mittleren Zugfestigkeit von 803 MPa erfüllen sie jedoch, aufgrund von Streuungen, nicht die Anforderungen an einen GJS 800-8 mit einer Mindestzugfestigkeit von 800 MPa. Damit fallen sie strenggenommen aus dem definierten Gültigkeitsbereich der Berechnungsansätze, vgl. Abschnitt 5.2.3. Die Abweichungen bei Versuchsreihe 22 aus [Zapl 08] können hier aufgrund von nur wenigen Angaben in der Quelle nicht erklärt werden. Die hohe Streuung wird hier jedoch auf den breiten Prüfbereich von $2 \cdot 10^2$ bis 10^8 Lastwechseln und die höheren Abweichungen in den Außenbereichen zurückgeführt.

In der Praxis würde anders als oben, insbesondere für die Werkstoffe bei denen die erfolgreiche Wärmebehandlung nicht vollständig sichergestellt werden kann, wie z.B. bei den Untersuchungen in [LEA 11], der Sicherheitsfaktor für Guss mindestens auf $j_G = 1,25$ gesetzt. Damit würden nahezu alle hier untersuchten Versuchsreihen auf der sicheren Seite liegen, Abbildung 5.23. Lediglich der nicht umgewandelte Werkstoff aus Versuchsreihe 16 liegt mit dem Streubereich noch teilweise im unsicheren Bereich. Zusätzlich wurden hier von Versuchsreihe 22 [Zapl 08] die Versuchsergebnisse bei sehr geringen Lastwechselzahlen ($< 10^3$ und damit unterhalb der Anwendungsgrenze von [FKM 12]) und sehr hohen Lastwechselzahlen ($> 5 \cdot 10^8$) nicht berücksichtigt. Die sehr hohen Lastwechselzahlen liegen hier auf der konservativen Seite, erhöhen jedoch die Streuung und führen somit nur zu einer scheinbaren Unsicherheit der Berechnung.

Damit ist das Sicherheitskonzept der FKM-Richtlinie [FKM 12] bei entsprechender Berücksichtigung der Qualität der Wärmebehandlung auch auf ADI-Werkstoffe übertragbar.

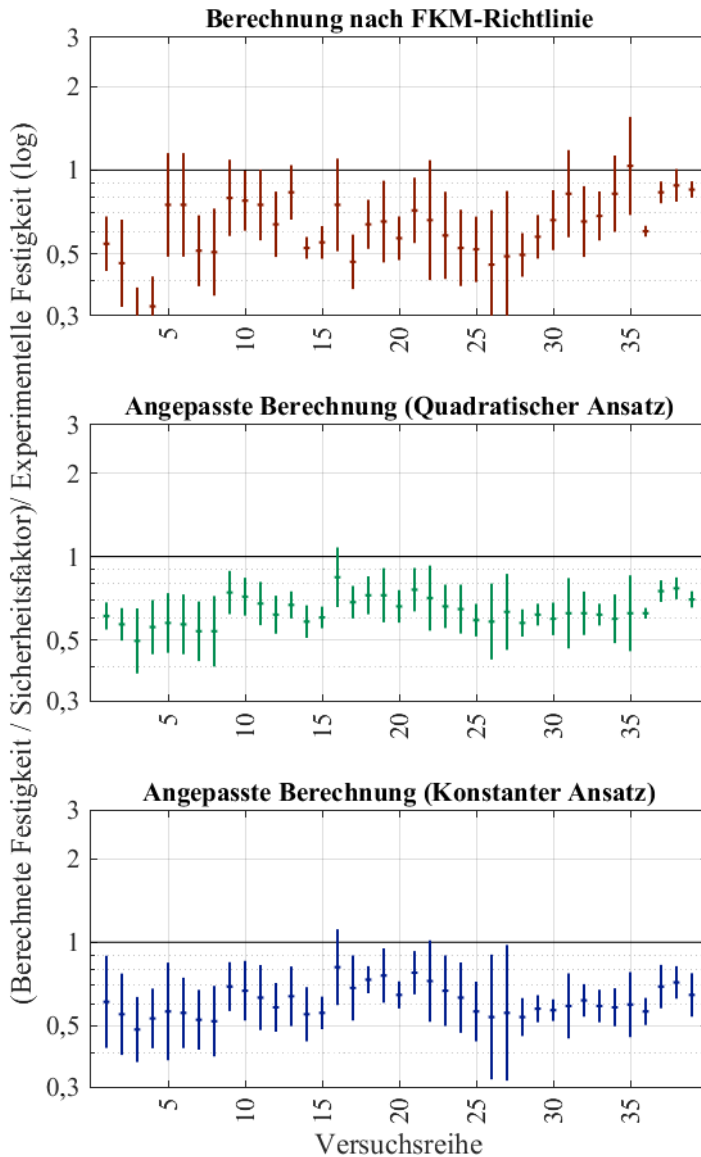


Abbildung 5.23: Gegenüberstellung von experimentell ermittelten Versuchspunkten und rechnerischen Wöhlerlinien unter Berücksichtigung eines üblichen Sicherheitsfaktors nach [FKM 12]

5.7 Berechnung auf Basis der Stützzahlen nach Stieler

In der industriellen Praxis ist die Verwendung der Stützzahlen nach Stieler [Stie 54], aufgrund der einfachen Anwendung noch weit verbreitet. In der FKM-Richtlinie [FKM 12] sind sie noch als Alternative zu den werkstoffmechanischen Stützzahlen aufgeführt. Aus diesem Grund wird im Folgenden die Anwendung der Stützzahlen nach Stieler auf ADI-Guss untersucht. Dazu wird die bereits oben genutzte Datenbasis verwendet.

Die Stützzahlen nach Stieler werden in Abhängigkeit vom bezogenen Spannungsgradienten nach den Gleichungen (5.18) bis (5.20) berechnet. In diese geht zusätzlich, neben der Zugfestigkeit, auch die Werkstoffgruppe über die Parameter a_G und b_G ein. Für GJS-Werkstoffe werden die Parameter zu $a_G = 0,05$ und $b_G = 3200$ gesetzt.

Für $G_\sigma \leq 0,1 \text{ mm}^{-1}$

$$n_\sigma = 1 + G_\sigma \cdot \text{mm} \cdot 10^{-\left(a_G - 0,5 + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}}\right)} \quad (5.18)$$

Für $0,1 \text{ mm}^{-1} < G_\sigma \leq 1 \text{ mm}^{-1}$

$$n_\sigma = 1 + \sqrt{G_\sigma \cdot \text{mm}} \cdot 10^{-\left(a_G + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}}\right)} \quad (5.19)$$

Für $1 \text{ mm}^{-1} < G_\sigma \leq 100 \text{ mm}^{-1}$

$$n_\sigma = 1 + \sqrt[4]{G_\sigma \cdot \text{mm}} \cdot 10^{-\left(a_G + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}}\right)} \quad (5.20)$$

Im ersten Schritt werden die Langzeitfestigkeiten basierend auf [FKM 12] unter Nutzung der Stützzahlen nach Stieler berechnet und mit den experimentellen Ergebnissen abgeglichen. Die Ergebnisdarstellung erfolgt hier analog zu Abschnitt 5.3 in Abbildung 5.24. Dabei sind auch wieder die Quellen rot markiert, bei denen die Werkstoffqualität angezweifelt wird. Wie bei der Berechnung nach [FKM 12] auf Basis der werkstoffmechanischen Stützzahlen, vgl. Abbildung 5.7, zeigt sich auch hier eine Überschätzung der Schwingfestigkeit mit steigender Zugfestigkeit. Insgesamt ist die Berechnung mit einer mittleren bezogenen Langzeitfestigkeit von 0,92 jedoch konservativer. Die Streubreite ist mit 1,78 vergleichbar.

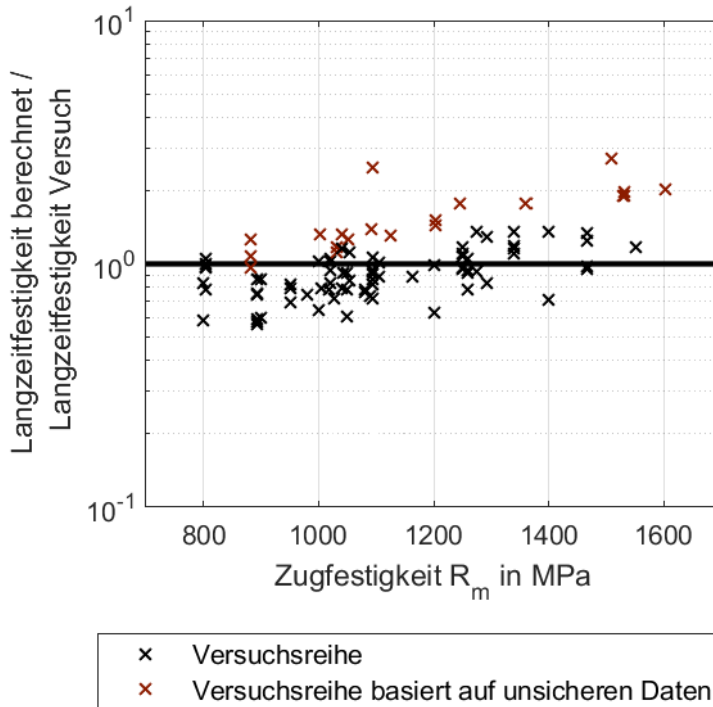


Abbildung 5.24: Gegenüberstellung der berechneten und der experimentellen Langzeitfestigkeit in Abhängigkeit der Zugfestigkeit. Berechnung nach [FKM 12] mit Stützzahlen nach Stieler

Im nächsten Schritt wird die Berechnung auf Basis der Berechnungsvariante 3, vgl. Abschnitt 5.3, jedoch mit den Stützzahlen nach Stieler durchgeführt. Das heißt die Werkstoff-Wechselspannungsfestigkeit wird auf 380 MPa festgesetzt und der Schubwechselspannungsfestigkeitsfaktor wird auf $f_{w,\tau} = 0,84$ gesetzt. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Abbildung 5.25 dargestellt. Mit einer mittleren bezogenen Langzeitfestigkeit von 0,96 liegen die Ergebnisse hier tendenziell auf der konservativen Seite. Auch die Streubreite ist mit 1,48 nur geringfügig höher als bei der Verwendung der werkstoffmechanischen Stützzahlen.

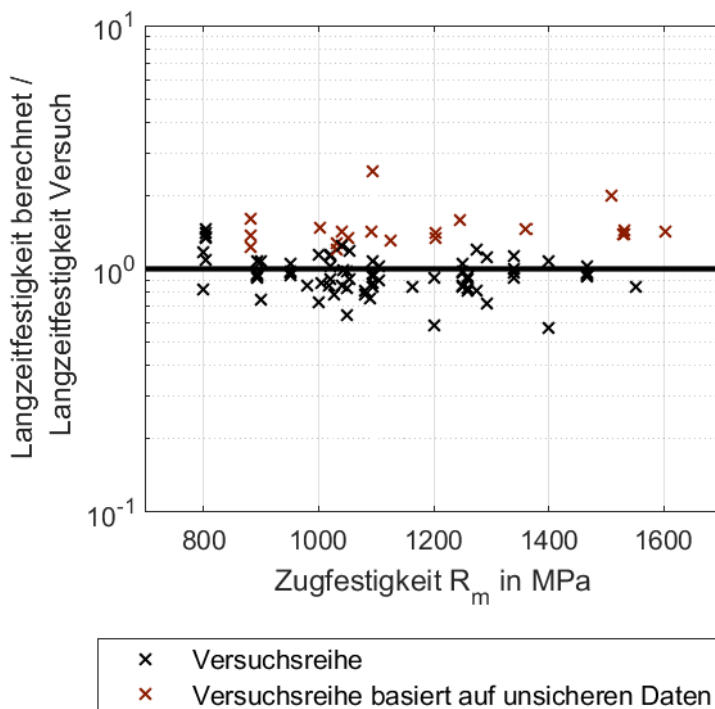


Abbildung 5.25: Gegenüberstellung der berechneten und der experimentellen Langzeitfestigkeit in Abhängigkeit der Zugfestigkeit. Berechnung nach angepasster [FKM 12] mit Stützzahlen nach Stieler

Ein Blick auf die Bewertung von Kerben zeigt, dass hier die werkstoffmechanischen Stützzahlen in der angepassten Form, zu einer besseren Übereinstimmung mit den experimentellen Daten führen. Dazu werden in Abbildung 5.14 zusätzlich die Daten für die Berechnung auf Basis der Stützzahlen nach Stieler eingefügt, Abbildung 5.26. Die Bewertung der Kerben streut nach Stieler mehr als die Bewertung auf Basis der angepassten werkstoffmechanischen Stützzahlen.

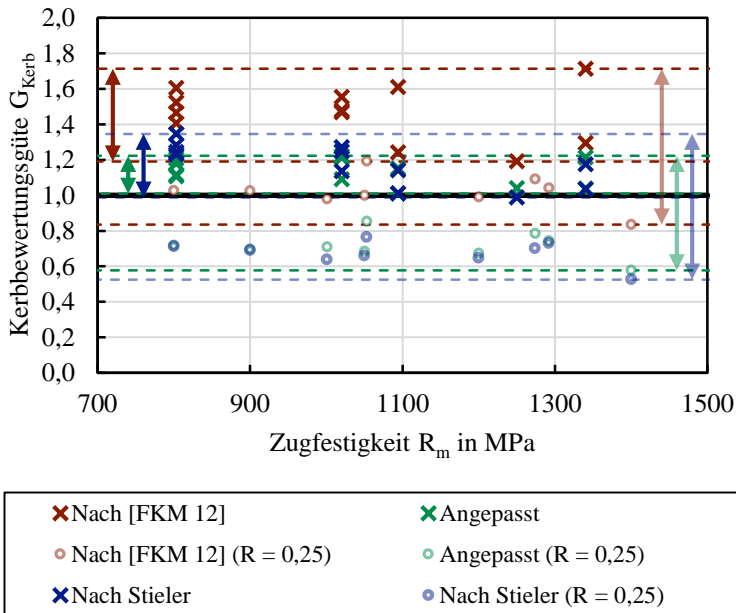


Abbildung 5.26: Vergleich der Bewertung von Kerben nach Stieler mit der Bewertung auf Basis der werkstoffmechanischen Stützzahlen

Aufbauend auf den oben gezeigten Ergebnissen, ist die Anwendbarkeit der Stützzahlen nach Stieler für die Auslegung von ADI-Gussbauteilen gegeben. Die Ergebnisgüte ist hier vergleichbar mit der auf Basis der werkstoffmechanischen Stützzahlen ermittelten. Durch die Anpassung der Berechnung kann auch hier die Auslegung höherfester ADI-Werkstoffe gewährleistet und die Streuung verringert werden.

Aufgrund der treffenderen Bewertung von Kerben sowie der Möglichkeit auch z.B. den Festigkeitsunterschied zwischen Flach- und Umlaufbiegung zu beschreiben, werden hier jedoch die werkstoffmechanischen Stützzahlen empfohlen. Real ausgeführte Bauteile haben zumeist aufwendige, stark von der relativ einfachen Probengeometrie abweichende, Geometrien, deren Festigkeitseigenschaften potenziell durch die werkstoffmechanischen Stützzahlen besser beschrieben werden können.

6 Vorschlag für die Anpassung der FKM-Richtlinie

Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen wird im Folgenden ein Vorschlag für eine Anpassung der FKM-Richtlinie [FKM 12] zur Berechnung von ADI-Gussbauteilen unterbreitet. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Berechnung auf Basis eines quadratischen Ansatzes mit angepassten Wöhlerlinnienneigungen zu der besten Übereinstimmung mit den experimentellen Versuchsergebnissen führt. Da diese Berechnungsvariante nur mit aufwendigen Anpassungen in die FKM-Richtlinie integrierbar ist, wird eine alternative Anpassung der FKM-Richtlinie vorgeschlagen. Die oben unter „Konstanter Ansatz“ bzw. Berechnungsvariante 3 aufgeführten Untersuchungen sind bereits mit dieser Variante berechnet. Es zeigt sich, dass die enthaltenen Anpassungen bereits zu deutlichen Verbesserungen gegenüber der Berechnung nach der klassischen FKM-Richtlinie führt. Die Treffsicherheit der Berechnung auf Basis des quadratischen Ansatzes wird zwar nicht vollständig erreicht, aufgrund der deutlich einfacheren Umsetzbarkeit, wird diese Anpassung dennoch bevorzugt.

Anpassung der FKM-Richtlinie am Beispiel des Ermüdungsfestigkeitsnachweises mit örtlichen Spannungen nach [FKM 12]:

Für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis wird die Zugfestigkeit des Werkstoffs benötigt. In den Untersuchungen wurde hier ein, am auch zyklisch untersuchtes Werkstoff, experimentell ermittelter Wert genutzt. Alternativ kann die Bauteilzugfestigkeit wie in [FKM 12] üblich auf Basis des Normwerts unter Berücksichtigung des technologischen Größenfaktors bestimmt werden. Die hierfür benötigten Konstanten, der effektive Durchmesser $d_{\text{eff},N}$ und $a_{d,m}$, können auf Basis von [EN DIN 1564] zu $d_{\text{eff},N} = 30 \text{ mm}$ und $a_{d,m} = 0,25$ abgeschätzt werden.

Bestimmung der Werkstoff-Wechselfestigkeit auf Basis der Zugfestigkeit

Derzeitiges Vorgehen nach [FKM 12]

Die Werkstoff-Wechselfestigkeit $\sigma_{w,zd}$ wird durch Multiplikation der Zugfestigkeit R_m mit einem Zugdruckwechselfestigkeitsfaktor $f_{w,\sigma}$ bestimmt, Gleichung (5.1). $f_{w,\sigma}$ ist werkstoffgruppenabhängig und für GJS mit 0,34 gegeben.

$$\sigma_{w,zd} = f_{w,\sigma} \cdot R_m \quad (5.1)$$

Vorschlag zur Verbesserung:

Die Untersuchungen zeigen eine nahezu von der Zugfestigkeit unabhängige, konstante Werkstoff-Wechselfestigkeit der untersuchten ADI-Werkstoffe. Damit wird eine konstante Werkstoff-Wechselfestigkeit von $\sigma_{w,zd} = 380 \text{ MPa}$ für

ADI-Werkstoffe vorgeschlagen. Der Anwendungsbereich liegt bei Werkstoffen mit einer Zugfestigkeit von 800 bis 1400 MPa wie sie in der Norm enthalten [DIN EN 1564] sind.

Bewertung von Schubbelastungen

Derzeitiges Vorgehen nach [FKM 12]

Die Schub-Wechselfestigkeit $\tau_{W,s}$ wird auf Basis der Werkstoff-Wechselfestigkeit bei Normalspannungen $\sigma_{W,zd}$ durch Multiplikation mit dem Schubwechselfestigkeitsfaktor $f_{W,\tau}$ bestimmt, Gleichung (5.10). Dieser ist in der FKM-Richtlinie werkstoffgruppenabhängig mit 0,65 für GJS angegeben.

$$\tau_{W,s} = f_{W,\tau} \cdot \sigma_{W,zd} \quad (5.10)$$

Vorschlag zur Verbesserung:

Auf Basis der Versuchsergebnisse wird vorgeschlagen, einen neuen Schubwechselfestigkeitsfaktor für ADI-Werkstoffe einzuführen, und diesen auf $f_{W,\tau} = 0,84$ zu setzen. Damit kann die experimentell geringere Schubempfindlichkeit von ADI in der Richtlinie berücksichtigt werden.

Bestimmung der Stützzahlen

Derzeitiges Vorgehen nach [FKM 12]

Die FKM-Richtlinie bietet grundsätzlich zwei Möglichkeiten zur Bestimmung der Stützzahlen. Hier soll lediglich auf das untersuchte Konzept der werkstoffmechanischen Stützzahlen eingegangen werden. Für die Stützzahlen nach Stieler vgl. Abschnitt 5.7.

Die werkstoffmechanischen Stützzahlen setzen sich aus der statistischen-, der verformungsmechanischen und der bruchmechanischen Stützzahl zusammen, Gleichung (5.3).

$$n_{\sigma} = n_{st} \cdot n_{vm} \cdot n_{bm} \quad (5.3)$$

Die statistische Stützzahl n_{st} wird hier auf Basis des hochbeanspruchten Volumens $V_{\sigma,st}$ nach Gleichung (5.4) bestimmt. Das hochbeanspruchte Volumen kann dabei als 90 % Volumen nach Sonsino [Sons 93] oder über ein Spannungsinintegral nach der Methode SPIEL [Diem 04] bestimmt werden. Hier wird die Methode SPIEL genutzt. Das Referenzvolumen ist in [FKM 12] nicht gegeben, es wird jedoch eine Referenzprobe mit einem Durchmesser von 8 mm bei einer Länge von 20 mm angegeben. Das Volumen von 1000 mm³ dieser Probe wird hier als Referenzvolumen genutzt. Der Weibull-Exponent ist werkstoffgruppenabhängig mit $k_{st} = 10$ für GJS angegeben.

$$n_{st} = \left(\frac{V_{ref,st}}{V_{\sigma,st}} \right)^{\frac{1}{k_{st}}} \quad (5.4)$$

Die verformungsmechanische Stützzahl ist mit $n_{vm} = 1$ für alle Gusswerkstoffe gegeben. Die bruchmechanische Stützzahl wird hier nicht weiter untersucht, da sie erst bei starkgekerbten Proben zum Tragen kommt. Des Weiteren fehlt in [FKM 12] die Angabe der Referenz-Zugfestigkeit für Gusswerkstoffe, die zur Bestimmung benötigt wird.

Vorschlag zur Verbesserung:

Die Bestimmung der statistischen Stützzahl nach dem oben vorgestellten Verfahren führt zu guten Übereinstimmungen mit den experimentellen Ergebnissen. Hier sollte lediglich der Weibull-Exponent auf $k_{st} = 18$ angepasst werden.

Die Berücksichtigung der verformungsmechanischen Stützwirkung führt in den Untersuchungen zu einer verbesserten Treffsicherheit der Berechnung. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, die verformungsmechanische Stützzahl auf Basis des Ansatzes, wie er in der FKM-Richtlinie für Stahl und Aluminiumwerkstoffe zu finden ist, zu nutzen, Gleichung (5.5). Für die dauerhaft ertragbare wechselplastische Dehnung wird hier zunächst ein fester Wert von $\varepsilon_{pl,W} = 1 \cdot 10^{-5}$ vorgeschlagen. Der Verfestigungsexponent kann anhand von Abbildung 9.6 abgeschätzt werden. Für die Festlegung der beiden Kennwerte sind jedoch weitere Untersuchungen nötig.

$$n_{vm} = \sqrt{1 + \frac{E \cdot \varepsilon_{pl,W}}{\sigma_W} \cdot (n_{st})^{\frac{1}{n'} - 1}} \quad (5.5)$$

Die bruchmechanische Stützwirkung wurde in dieser Arbeit nicht untersucht.

Berücksichtigung der Mittelspannungsempfindlichkeit

Derzeitiges Vorgehen nach [FKM 12]

Die Mittelspannungsempfindlichkeit wird in der FKM-Richtlinie mit den Gleichungen (5.7) und (5.8) bestimmt. Wobei $a_M = 0,35$ und $b_M = 0,08$ werkstoffgruppenabhängig in der Richtlinie vorgegeben sind.

$$M_{\sigma,FKM} = a_M \cdot 10^{-3} \cdot \frac{R_m}{\text{MPa}} + b_M \quad (5.7)$$

$$M_{\tau,FKM} = M_{\sigma,FKM} \cdot f_{W,\tau} \quad (5.8)$$

Vorschlag zur Verbesserung:

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen hier keine wesentlichen Verbesserungen durch die Anpassung. Die Berechnungsmethode der Mittelspannungsempfindlichkeit zeigt zwar Abweichungen zu den experimentellen Ergebnissen, jedoch sind diese auch für andere Werkstoffe bekannt, [Schl 18]. Aus diesem Grund wird hier an der Stelle keine Änderung zur Bestimmung der Mittelspannungsempfindlichkeit vorgeschlagen.

Anwendungsgrenzen

Den Untersuchungen liegt eine Datenbasis zu Grunde, mit vergleichsweise umfangreichen Werkstoffdaten im Zugfestigkeitsbereich von 803 bis 1466 MPa. Die Anwendungsgrenzen werden entsprechend der genormten Werkstoffe nach [EN DIN 1564] gesetzt. Damit können Werkstoffe im Zugfestigkeitsbereich von 800 bis 1400 MPa ausgelegt werden.

Weiterhin ist die Berechnung nur bei einer entsprechenden Werkstoffqualität möglich. Fehlerhafte Wärmebehandlungen können z.B. zur Entstehung von Martensit oder Carbiden führen, die die Schwingfestigkeit negativ beeinflussen, [Bahm 97]. Weiterhin weisen unvollständig umgewandelte Gefüge geringere Schwingfestigkeiten auf [Lea 11]. Der Sicherheitsfaktor für Guss ist hier entsprechend zu wählen, vgl. hierzu auch Abschnitt 5.6.

Verwendung von Stützzahlen nach Stieler

Die Ergebnisse in Abschnitt 5.7 zeigen, dass die Stützzahlen nach Stieler vergleichbare Ergebnisse liefern wie die werkstoffmechanischen Stützzahlen. Damit ist ihre Anwendbarkeit auch für ADI-Gussbauteile gegeben. Da Festigkeitsunterschiede wie z.B. zwischen Flach- und Umlaufbiegung jedoch nicht auf Basis der Stützzahlen nach Stieler beschrieben werden können, wird hier die Verwendung der werkstoffmechanischen Stützzahlen empfohlen.

Aufgrund der kleinen Datenbasis, die nur Versuche an geometrisch einfachen Proben enthält, konnte die Übertragbarkeit der Berechnungsalgorithmen auf all-gemeingeformte Bauteile nicht untersucht werden. Hier wird jedoch, aufgrund der vorhandenen physikalischen Basis bei den werkstoffmechanischen Stützzahlen, ebenfalls von einer besseren Übertragbarkeit im Vergleich mit den Stützzahlen nach Stieler ausgegangen.

7 Literaturverzeichnis

- [Bahm 97] Bahmani, M.; Elliott, R.: The relationship between fatigue strength and microstructure in an austempered Cu-Ni-Mn-Mo alloyed ductile iron; *Journal of Materials Science* 32, pp. 5383 – 5388; 1997
- [Baue 05] Bauer, W.: Biegewechselverhalten von Gusseisen mit Kugelgraphit – Auswirkungen der Gusschaut – Gefüge- und Güteermkmale; *Giesserei-Rundschau* 52; Heft 1/2 S. 18-28, 2005
- [Bäum 90] Bäumel, A. Jr.; Seeger, T.: *Materials Data for Cyclic Loading. Supplement 1.* Elsevier, Amsterdam, 1990
- [Bösh 89] Böschen, R.; Bomas, H.; Mayr, P.; Vettters, H.: Martensite Formation in austempered Ductil Iron with Unidirectional and Cyclic Loading; *Proc. Conf. "The Martensitic Transformation in Science and Technology"* (Ed. E. Hornbogen) Bochum, DGM, 1989
- [Chap 06] Chapetti, M.: High-cycle fatigue of austempered ductile iron (ADI); *International Journal of Fatigue* 29; S. 860-868; 2006
- [Coff 54] Coffin, L. F. Jr.; Schenectady, N. Y.: A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal. In: *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, vol. 76, pp. 931-950, New York 1954
- [Chri 09] Christ, H.-J.: *Ermüdungsverhalten metallischer Werkstoffe*, zweite Auflage, Wiley-vch Verlag, Weinheim 2009
- [Devr 96] Devroye, L.: Random Variate Generation in One Line of Code. In: charnes, J.-M. ; Morrice, D.-J.; Brunner, D.-T.; Swain, J.-J. (Hrsg.): *Winter Simulation Conference Proceed-ings*. Coronado : WSC, 1996, S.265-272
- [Diem 04] Diemar, A.; Thumser, R.; Bergmann, J.: Statistischer Größeneinfluss und Bauteilfestigkeit; *Materials Testing* 46 S. 16-21, Carl Hanser Verlag, München 2004

- [DIN 1564] Norm DIN EN 1565:2012-01 - Gießereiwesen - Ausferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit
- [DIN 148-1] Norm DIN EN ISO 148-1:2011-01 - Metallische Werkstoffe – Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy
- [DIN 50100] Norm DIN 50100:2016-12 - Schwingfestigkeitsversuch – Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile
- [DIN 6892-1] Norm DIN EN ISO 6892-1:2017-02 - Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur
- [Enge 17] Engelke, T.; Esderts, A.: Slope estimation of the S-N curve in the long-life fatigue region; Proceedings of the 5th Symposium on Structural Durability in Darmstadt; S. 191-198; Technische Universität Darmstadt; Darmstadt 2017
- [Enge 18a] Engelke, T.; Esderts, A.: Betriebsfestigkeitsnachweis von ADI-Gussbauteilen, Untersuchung von ADI-Gussbauteilen auf ihre zyklische Festigkeit bei unterschiedlichen Mittelspannungen; FVA-Heft 1279, Frankfurt 2018
- [Enge 18b] Engelke, T.; Esderts, A.: Rechnerischer Festigkeitsnachweis von ADI-Gussbauteilen; DVM-Tagung Neue Entwicklungen für die Bauteilfestigkeitsnachweise, S. 159-166, DVM 2018
- [Enge 18c] Engelke, T.; Esderts, A.: Analytical Strength Assessments of Austempered Ductile Iron Components - Dedicated to Professor Dr.-Ing. Harald Zenner on the occasion of his 80th birthday; Veröffentlichung vorraussichtlich in: Materials Testing, Materialprüfung, 10/2018
- [FKM 12] Rennert, R.; Kullig, E.; Vormwald, M.; Esderts, A.; Siegele, D.: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile; 6. Auflage; FKM; Frankfurt; 2012
- [FKM 198] Buschermöhle, H.: Vereinheitlichung von Proben für Schwingversuche; Vorhaben Nr. 198; FKM; Frankfurt; 1995

- [Geor 15] Georgii, H.O.: Stochastik; Einführung in die Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik; Walter de Gruyter GmbH; Berlin/Boston; 2015
- [Gilb 86] Gilbert, G. M. J.: Engineering data for austempered ductile irons (ADI) – interim data sheets for three tentative grades; BCIRA Journal Vol. 34, S. 203-232; 1986
- [Gude 99] Gudehus, H. ; Zenner, H.: Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung. 4. Aufl. Düsseldorf: Stahleisen, 1999
- [Hanz 06] Hanzlíková, K.; Vechet, S.; Kohout, J.: The relation between microstructure composition and fatigue properties of ADI; Komunikácie / Communications – Scientific Letters of the University of Zilina, S. 47-51; 4/2006
- [Haib 06] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit. Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. 3. korrigierte und ergänzte Auflage, Springer, Berlin 2006
- [Häne 10] Hänel, B.; Kullig, E.; Vormwald, M.; Hertel, O.; Esderts, A.; Hinkelmann, K.; Siegele, D.; Hohe, J.: Verbessertes Berechnungskonzept FKM-Richtlinie; Vorhaben Nr. 282 Ein verbessertes Berechnungskonzept des statischen Festigkeitsnachweises und des Ermüdungsfestigkeitsnachweises für nichtgeschweißte und geschweißte Maschinenbauteile nach der FKM-Richtlinie „Festigkeitsnachweis“; Forschungskuratorium Maschinenbau, Heft 306, Frankfurt 2010
- [Hass 96] Hasse, S.: Duktiles Gusseisen, Handbuch für Gußerzeuger und Gußverwender, Schiele & Schön GmbH; Berlin 1996
- [Hass 08] Hasse, S.: Gefüge und Gusseisenlegierungen, Structure of Cast Iron Alloys; Schiele & Schön GmbH; Berlin 2008
- [Hein 12] Heinrietz, A.; Wallmichrath, N: Potentiale der Belastbarkeit von Bauteilen aus wärmebehandeltem ADI-Gusseisen mit Kugelgraphit; Technologie & Trendes; Giesserei 99, S. 46-55; 11/2012

- [Hück 83] Hück, M.: Ein verbessertes Verfahren für die Auswertung von Treppenstufenversuchen. In: Zeitschrift für Werkstofftechnik 14 (1983-12) S. 406-417
- [Keou 10] Keough J.; Hayrynen, K.: Designing with austempered Ductile Iron (ADI); AFS Proceedings 2010; American Foundry Society; Schaumburg 2010
- [Khal 05] Khalil, O: Untersuchungen zur Dauerfestigkeit und Metallographie von Austempered Ductile Iron, Clausthal-Zellerfeld, TU Clausthal, Diplomarbeit 2005
- [LEA 11] Schäfer, W.; Hepp, E.; Sturm, J.; Heinrietz, A.; Böhme, W.; Heckmann, J.; Petzschmann, U.; Pustal, B.; Siebert, H.; Stich, A.; Müller, H.; Schmidt, S.: LEA – Leichtbau mit gegossenen ADI-Bauteilen; BMBF; Bonn; 2011
- [Lin 96 a] Lin, C.; Lai, P.; Shih, T.: Influence of microstructure on fatigue properties of austempered ductile irons – I. High-cycle fatigue; Int. J. Fatigue Vol. 18 No. 5, pp. 297-307; 1996
- [Lin 96 b] Lin, C.; Hung, T.: Influence of microstructure on fatigue properties of austempered ductile irons – II. Low-cycle fatigue; Int. J. Fatigue Vol. 18 No. 5, pp. 309-320; 1996
- [Lin 98] Lin, C.; Lee, W.: Effects of highly stressed volume on fatigue strength of austempered ductile irons; Int. J. Fatigue Vol. 20 No. 4, pp. 301-307; 1998
- [Liu 91] Liu, J.: Beitrag zur Verbesserung der Dauerfestigkeitsberechnung bei mehrachsiger Beanspruchung, Clausthal-Zellerfeld, TU Clausthal, Diss., 1991
- [Liu 91a] Liu, J.; Zenner, H.: Berechnung der Dauerfestigkeit unter Berücksichtigung der spannungsmechanischen und statistischen Stützziffer, Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 22, S. 187-196, Weinheim 1991
- [Liu 01] Liu, J.: Dauerfestigkeitsberechnung metallischer Werkstoffe, Clausthal-Zellerfeld, TU Clausthal, Fakultät Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen, Habil., 2001

- [Mans 65] Manson, S. S.: Fatigue: A Complex Subject - Some Simple Approximations. In: Experimental Mechanics, vol 5, July 1965, pp. 193-226
- [Mart 11a] Martin, A.; Hinkelmann, K.; Esderts, A.: Zur Auswertung von Schwingfestigkeitsversuchen im Zeitfestigkeitsbereich – Teil 1; Materials Testing; Hanser; München; 2011
- [Mart 11b] Martin, A.; Hinkelmann, K.; Esderts, A.: Zur Auswertung von Schwingfestigkeitsversuchen im Zeitfestigkeitsbereich – Teil 2; Materials Testing; Hanser; München; 2011
- [Masa 10] Masaggia, S.: The development of ADI and IDI in Italy; Procedia Engineering 2; S.1459-1476; Elsevier 2010
- [Müll 15] Müller C.: Zur statistischen Auswertung experimenteller Wöhlerlinien, Clausthal-Zellerfeld, Dissertation TU Clausthal, 2015
- [Munz 71] Munz, D.; Schwalbe, K. Mayr, P.: Dauerschwingverhalten metallischer Werkstoffe, Werkstoffkunde, Grundlagen Forschung Entwicklung 3, Vieweg Verlag, Braunschweig 1971
- [Mura 02] Murakami, Y.: Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions; Elsevier Science Ltd; Oxford 2002
- [Neug 86] Neugebauer, J.: Zum Schwingfestigkeitsverhalten von Gußwerkstoffen unter mehrachsiger, frequenzverschiedener Beanspruchung; LBF Bericht NR. FB-175; Darmstadt 1986
- [Neub 61] Neuber H.: Theory of Stress Concentration for Shear-Strained Prismatical Bodies With Arbitrary Nonlinear Stress-Strain Law; In: Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics, December 1961, pp. 544-550
- [Neub 68] Neuber, H. Über die Berücksichtigung der Spannungskonzentration bei Festigkeitsberechnungen; Konstruktion Im Maschinen- Apparat- und Gerätebau 20. 1968 Heft 7
- [Rada 07] Radaj, D.; Vormwald, M.: Ermüdungsfestigkeit. Grundlagen für Ingenieure. 3., neubearbeitete und erweiterte Auflage, Springer, Berlin, 2007

- [Ramb 43] Ramberg, W.; Osgood, W. R.: Description of stress-strain curves by three parameters. Technical Note No. 902, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington DC, 1943
- [Röhr 03] Röhrig, K.: 2. Europäische ADI-Entwicklungskonferenz – Eigenschaften, Bauteilentwicklung und Anwendung; konstruieren und gießen 28, S. 2-14; 2003
- [Ross 64] Rossow, E.: Eine einfache Rechenschiebernäherung an die den normal scores entsprechenden Prozentpunkte. In: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung 59 (1964-12), S. 596-597
- [Saal 16] Saal, P.: Quantitative Phasenanalyse von ausferritischem Gusseisen mithilfe der Neutronendiffraktometrie; München, Fakultät für Maschinenwesen, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, Diss., 2016
- [Schö 15] Schönborn, S.: Zur Bemessung von zyklisch innendruck-beanspruchten Bauteilen aus Gusseisenwerkstoffen mit Kerbgrundkonzepten; LBF-Bericht FB-248, Fraunhofer Verlag; Darmstadt 2015
- [Schl 18] Schlecht, B.; Neikes, K.; Leidich, E.; Hausschild, S.; Vetter, S.: Mittelspannungseinfluss von Stählen; DVM-Tagung Neue Entwicklungen für die Bauteilfestigkeitsnachweise; DVM e.V., Berlin 2018
- [Seeg 96] Seeger, T.: Stahlbau Handbuch, Grundlagen für Betriebsfestigkeitsnachweise; Stahlbau-Verlagsgesellschaft mbH, Köln (1996)
- [SEP 1240] VDEh (Hrsg.): STAHL-EISEN-Prüfblatt 1240. Prüf- und Dokumentationsrichtlinie für die experimentelle Ermittlung mechanischer Kennwerte von Feinblechen aus Stahl für die CAE-Berechnung. 1. Ausgabe, VDEh, Düsseldorf, 2006
- [Sons 93] Sonsino, C. M.: Zur Bewertung des Schwingfestigkeitsverhaltens von Bauteilen mit Hilfe von örtlichen Beanspruchungen; Konstruktion 45(1), 25-33, 1993

- [Sons 05] Sonsino, C. M.; Zinke R.; Heim, R.; Hanselka, H.; Fahrwerksbauteile aus EN-GJS-400-15 und EN-GJS-800-0(ADI) unter quasistatischer, schlagartigen und zyklischen Betriebsbelastungen, Giessereiforschung 57 (2005) Nr. 4
- [Sons 05b] Sonsino, C. M.: „Dauerfestigkeit“ – Eine Fiktion; Zeitschrift Konstruktion April 4-2005
- [Spin 79] Spindel J.E.; Haibach E.: The method of maximum likelihood applied to the statistical analysis of fatigue data; International Journal of Fatigue April 1979 S. 81-88
- [Spin 81] Spindel J.E.; Haibach E.: Some Considerations in the Statistical Determination of the Shape of S-N Curves; ASTM STP 744 1981, 89-113
- [Stie 54] Stieler, M.: Untersuchung über die Dauerschwingfestigkeit metallischer Bauteile bei Raumtemperatur. Dissertation TH Stuttgart, 1954
- [Stör 15] Störzel K.: Zuverlässigkeit bei der statistischen Auswertung von Schwingfestigkeitsversuchen; DVM-Workshop; Zuverlässigkeit und Probabilistik IV; München 2015
- [Vask 09] A. Vasko: The factors influencing microstructure and mechanical properties of ADI; ARCHIVES OF FOUNDRY ENGINEERING Volume 9, Issue 1/2009, 133-136; Žilina 2009
- [Vech 06] Vechet, S.; Kohout, J.; Hanlikova, K.; Vojtech, H.; Fatigue behaviour of nodular cast iron at various loading cycle asymmetry; Komunikacie / Communications– Scientific Letters of the University of Zilina, S. 42-47; 4/2006
- [Vett 99] Vettters, H.; Bomas, H.; Mayr, P.: Wechselverformungsverhalten von Sphäroguß nach Bainitisierung und induktiver Randschichtbehandlung; Journal of Heat Treatment and Materials 54; 1999
- [Wäch 17] Wächter, M.; Müller, C.; Esderts, A.: Angewandter Festigkeitsnachweis nach FKM-Richtlinie, Kurz und bündig; Springer Vieweg Verlag; Wiesbaden 2017

- [Wohl 10] Wohlfart, M.; Oberwinkler, C.; Tunzini, S.; Rauscher, A.; de la Prida Caballero, R.; Eichlseder, W.: The role of sampling position on fatigue of austempered ductile iron; *Procedia Engineering* 2 (2010), pp. 1337–1341
- [Wohl 11a] Wohlfahrt, M.; Oberwinkler, C.; Eichlseder, W.; Tunzini, S.; Rauscher, A.; Caballero, R.: Einflüsse auf die Schwingfestigkeit von Gusseisen und deren Einbindung in die Berechnung der Bauteillebensdauer, VDI-Bericht 2122; Düsseldorf; 2011
- [Wohl 11b] Wohlfahrt, M.; Kainzinger, P.; Redik, S.; Eichlseder, W.: Gefügeeinfluss auf die lokale Schwingfestigkeit verschiedener Gusswerkstoffe und Vorhersage mittels Erstarrungssimulation; *Giesserei-Rundschau* 58; Heft 9/10; 2011
- [Zhan 15] Zhang, J.; Li, W.; Song, Q.; Zhang, N.; Lu, L.: Fatigue of Austempered Ductile Iron with Two Strength Grades in Very High Cycle Regime; *Journal of Materials Engineering and Performance*; 25:744-749; CrossMark 2016
- [Zapl 08] Zapletel, J.; Vechet, S.; Kohiut, J.; Obtrlík, K.: Fatigue Lifetime of ADI from ultimate tensile strength to permanent fatigue limit; *Strength of Materials*, Vol. 40, No. 1; Springer Science + Business Media; 2008

8 Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Lateinische Symbole

A	Bruchdehnung
a_G	Konstante: Bestimmung der Stützzahlen nach Stieler
a_M	Konstante: Bestimmung Mittelspannungsempfindlichkeit
b	zyklischer Schwingfestigkeitsexponent
b_G	Konstante: Bestimmung der Stützzahlen nach Stieler
b_M	Konstante: Bestimmung Mittelspannungsempfindlichkeit
c	zyklischer Duktilitätsexponent
C	Konstante zur Beschreibung der Lage der Wöhlerlinie
C_{LLF}	Konstante zur Beschreibung der Lage der Wöhlerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich
E	Elastizitätsmodul
\underline{F}_{SAD}	Matrix der Fehler bei der Bestimmung der Werkstoff-Wechselselfestigkeiten
$f_{W,\sigma}$	Wechselselfestigkeitsfaktor
$f_{W,\sigma,1}$	linearer Wechselselfestigkeitsfaktor
$f_{W,\sigma,2}$	quadratischer Wechselselfestigkeitsfaktor
$f_{W,\tau}$	Schubwechselselfestigkeitsfaktor
f_σ	Druckfestigkeitsfaktor
G	Schubmodul
G_σ	Bezogenes Spannungsgefälle
j_{ges}	Sicherheitsfaktor
k	Neigung der Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsbereich
k^*	Neigung der Wöhlerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich
k_{st}	Weibull-Exponent
K'	zyklischer Verfestigungskoeffizient
K_{AK}	Mittelspannungsfaktor
$K_{NL,E}$	Faktor für GJL
K_t	Formzahl
K_R	Rauheitsfaktor
K_S	Schutzschichtfaktor
K_V	Randschichtfaktor
$K_{WK,\sigma}$	Konstruktionsfaktor
\tilde{K}_f	Schätzwert der Kerbwirkungszahl
L	Wahrscheinlichkeit „Maximum-Likelihood“
L_a	Lastamplitude
\underline{M}_{SAD}	Matrix der mittleren Werkstoff-Wechselselfestigkeiten
M_σ	Mittelspannungsempfindlichkeit (Normalspannungen)
M_τ	Mittelspannungsempfindlichkeit (Schubspannungen)

n'	zyklischer Verfestigungsexponent
n_B	Anzahl der Brüche
n_D	Anzahl der Durchläufer
n_{bm}	bruchmechanische Stützzahl
n_{st}	statistische Stützzahl
n_{vm}	verformungsmechanische Stützzahl
n_σ	Stützzahl
N	Schwingspielzahl
N_A	Anrisschwingspielzahl
N_B	Bruchschwingspielzahl
N_G	Grenzlastschwingspielzahl
N_{sup}	Schwingspielzahl am Stützpunkt
M_σ	Mittelspannungsempfindlichkeit (Normalspannungen)
M_τ	Mittelspannungsempfindlichkeit (Schubspannungen)
p	Wahrscheinlichkeitsdichte
P	Wahrscheinlichkeit
P_A	Ausfallwahrscheinlichkeit
R	Spannungsverhältnis
R^2	Bestimmtheitsmaß
R_m	Zugfestigkeit
$R_{m,N}$	Normwert der Zugfestigkeit
S	Nennspannung
S_A	Spannungsamplitude
S_{AD}	Dauerfest- bzw. Langzeitfest ertragbare Spannungsamplitude
$S_{A,sup}$	Spannungsamplitude am Stützpunkt
S_o	Oberspannung
S_m	Mittelspannung
S_{SK}	Festigkeit bei schwellender Belastung
S_u	Unterspannung
S_{WK}	Festigkeit bei wechselnder Belastung
$V_{ref,st}$	hochbeanspruchtes Volumen einer Referenzprobe
$V_{\sigma,st}$	hochbeanspruchtes Volumen des Bauteils

Griechische Symbole

ε	Dehnung
$\varepsilon_{a,ges}$	Gesamtdehnungsamplitude
$\varepsilon_{a,el}$	elastischer Anteil der Dehnungsamplitude
$\varepsilon_{a,pl}$	plastischer Anteil der Dehnungsamplitude
ε'_f	zyklischer Duktilitätskoeffizient
σ	örtliche Spannung

σ_a	örtliche Spannungsamplitude
σ'_f	zyklischer Schwingfestigkeitskoeffizient
σ_{WK}	Bauteil-Wechselfestigkeit
$\sigma_{W,zd}$	Werkstoff-Wechselfestigkeit unter Zugdruckbelastung
τ	örtliche Schubspannung
$\tau_{W,s}$	Werkstoff-Wechselfestigkeit unter Schubbelastung
τ_{WK}	Bauteil-Wechselfestigkeit unter Schubbelastung
δ	Winkel der Phasenverschiebung

Abkürzungen

ADI	Austempered Ductile Iron
CAO	Computer Aided Optimization
DMS	Dehnungsmessstreifen
FE	Finite Elemente
FEM	Finite Elemente Methode
FKM	Forschungskuratorium Maschinenbau
GJL	Gusseisen mit Lamellengraphit
GJS	Gusseisen mit Kugelgraphit
HCF	High Cycle Fatigue (Zeitfestigkeitsbereich)
LLF	Long Life Fatigue (Langzeitfestigkeitsbereich)
ZTU	Zeit-Temperatur-Umwandlung

9 Anhang

9.1 Berechnung des hochbeanspruchten Volumens

Für die Finite-Elemente-Berechnungen wird die ANSYS Workbench in der Version 17.2 genutzt. Im FE-Programm werden die genutzten Proben modelliert, um die örtlichen Spannungen sowie die Spannungsverteilung nachzuvollziehen. Neben den örtlichen Spannungen und Spannungsgradienten werden auch die hochbeanspruchten Volumina in ANSYS bestimmt. Die Bestimmung der hochbeanspruchten Volumina erfolgt nach dem Verfahren SPIEL (Spannungsintegral mit Einheitslasten) nach [Diem 04].

9.1.1 Flachbiegung

Die Biegeprobe ist als Halbmodell in ANSYS modelliert, Abbildung 9.1. Durch Ausnutzung der Symmetrie ist die Probe längs in der Biegeebene geteilt. Im Prüfbereich ist die Vernetzung „Hex Dominate“ bei einer Elementgröße von 0,75 mm. Im für die hier durchgeführten Berechnungen weniger relevanten Einspannbereiche sind die Elemente etwas größer gewählt. Das Biegemoment wird an der Außenfläche an einer Probenseite eingeleitet. Für die gegenüberliegende Seite wird die Verschiebung in allen Raumrichtungen blockiert. Durch diese Anordnung wird ein Einfluss, der fixierten Knoten in der Einspannung, auf den relevanten Prüfbereich vermieden. Die Symmetrie wird durch die Sperrung der Verschiebung in der Schnittebene senkrecht zur Schnittebene erreicht.

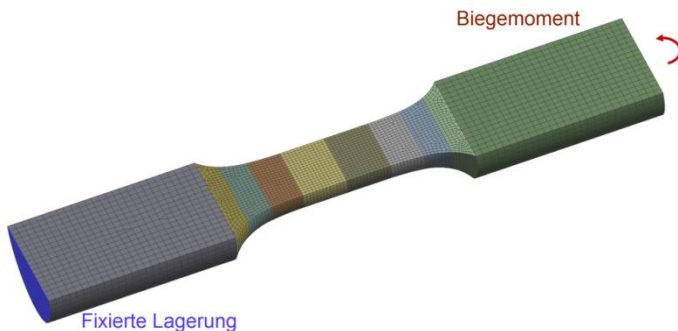


Abbildung 9.1: Vernetzte Biegeprobe (ANSYS 17.2)

Die Umsetzung in ANSYS zur Bestimmung des hochbeanspruchten Volumens erfolgt in Anlehnung an [Wäch 17]. Zunächst wird die Probe, wie oben beschrieben, belastet und die Vergleichsspannung nach von Mises berechnet. Die

Vergleichsspannung σ_i wird für die Eckknoten im relevanten Prüfbereich ausgegeben. Anschließend muss für jeden Knoten das zugehörige, anteilige Volumen V_i bestimmt werden. Hierzu wird die Probe einer Beschleunigung von 1 m/s^2 ausgesetzt und die Knotenverschiebung aller Knoten blockiert. Die sich nun an den Knoten ergebenden Reaktionskräfte berechnen sich aus der Beschleunigung und der zum Knoten gehörenden Masse, welche sich aus der Dichte und Volumen bestimmt. Somit ist eine Rückrechnung auf das Volumen möglich. Das Spannungsintegral kann nun mit den Knotenspannungen aus der Biegebeanspruchung und den anteiligen Knotenvolumen bestimmt werden. Das hochbelastete Volumen $V_{\sigma, st}$ ergibt sich nach Gleichung (9.1) [DIEM 04]. Der Weibull-Exponent ist in [FKM 12] mit $k_{st} = 10$ für Kugelgraphitguss gegeben. Bei der Berechnung muss berücksichtigt werden, dass ein Halbmodell genutzt wird und die berechnete Fläche zu verdoppeln ist.

$$V_{\sigma, st} = \sum_{i=1}^m \left[V_i \cdot \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{max}} \right)^{k_{st}} \right] \quad (9.1)$$

σ_{max}	Maximale Vergleichsspannung
m	Anzahl der Knoten

9.1.2 Torsion

Für die Berechnung der Torsionsprobe wird ebenfalls ein Halbmodell genutzt. Die Teilungsebene liegt senkrecht zur Momentenachse in der Probenmitte, Abbildung 9.2. Die Vernetzung ist äquivalent zu der der Biegeprobe. Die Einleitung des Torsionsmoments erfolgt, wie bei der Biegeprobe an der Außenfläche. Die Lagerung liegt hier in der Symmetrieebene. Die Verschiebung entlang der Probenachse sowie in Umfangsrichtung ist hier blockiert. Verschiebungen in Radialerrichtung sind frei. Die Berechnung des hochbeanspruchten Volumens erfolgt analog zur Biegeprobe. Das berechnete hochbeanspruchte Volumen ist im Fall der Torsion deutlich größer, da der oberflächennahe Bereich entlang des kompletten Umfangs hohen Spannungen ausgesetzt ist.

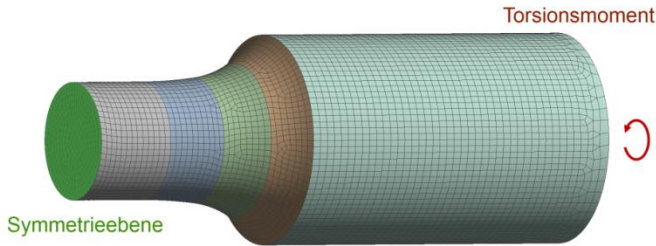


Abbildung 9.2: Vernetzung Torsionsprobe (ANSYS)

9.1.3 Umlaufbiegung

Die Berechnungen für die Umlaufbiegung nutzen das Modell der Flachbiegung. Da die Belastung jedoch bei einem Schwingenspiel einmal um die Probe herumläuft, muss dies in der Berechnung für das hochbeanspruchte Volumen berücksichtigt werden. Der Fall der Flachbiegung entspricht also nur einem einzelnen Zeitpunkt der Umlaufbiegung. Aus ihm kann jedoch der Spannungsverlauf ins Innere der Probe entnommen werden, wie er für jeden Punkt auf dem Umfang einmal pro Umdrehung auftritt, Abbildung 9.3.

Die Berechnung des Volumens erfolgt, indem die Schnittfläche senkrecht zur Momentenachse betrachtet wird. Hier werden zunächst die zu den Knoten gehörenden Flächen bestimmt. Dazu wird, wie in [Wäch 17] beschrieben, ein Druck auf die Schnittfläche aufgebracht. Aus den Knotenreaktionskräften kann dann auf die jeweils zu den Knoten gehörenden Flächen zurückgeschlossen werden. Aus diesen lassen sich nun, mit den dazugehörigen Radien, Ringvolumina berechnen. Diese Volumina entsprechen den Volumina die mit der dazugehörigen Spannung aus der Flachbiegesimulation einmal pro Umdrehung belastet werden. Sind die Volumina sowie die Spannungen der einzelnen Knoten bzw. Volumen bekannt, kann mit Gleichung (9.1) das Spannungsintegral bestimmt werden.

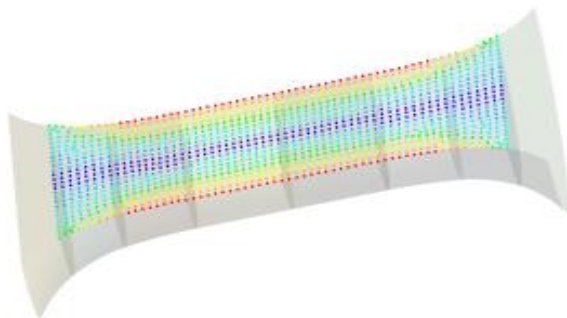


Abbildung 9.3: Knoten zur Bestimmung der hochbeanspruchten Oberfläche im Fall der Umlaufbiegung

9.1.4 Andere Probenformen

Für andere Probenformen erfolgt die Bestimmung des hochbeanspruchten Volumens analog zu den oben gezeigten Fällen.

9.2 Abschätzung der zyklischen Kennwerte

Für die Berechnung der verformungsmechanischen Stützwirkung werden Informationen über das zyklische Werkstoffverhalten benötigt. Für die am Institut durchgeführten Versuche liegen diese Informationen aus entsprechenden Versuchen vor. Für Literaturquellen sind die erforderlichen Angaben jedoch nicht immer verfügbar. Aus diesem Grund müssen sie abgeschätzt werden.

Dazu werden zunächst die verfügbaren Daten ausgewertet. Neben den eigenen Versuchen, vgl. Abschnitt 4.4.2, werden die Daten aus [LEA 11] ausgewertet. Hier liegen mehrere Versuchsreihen für einen ADI 1000 vor. Die vorliegenden Einzelversuche werden zunächst zusammen ausgewertet. Damit ergeben sich das in Abbildung 9.4 dargestellte zyklische Spannungs-Dehnungsdiagramm sowie die in Abbildung 9.5 dargestellte Dehnungswöhlerlinie.

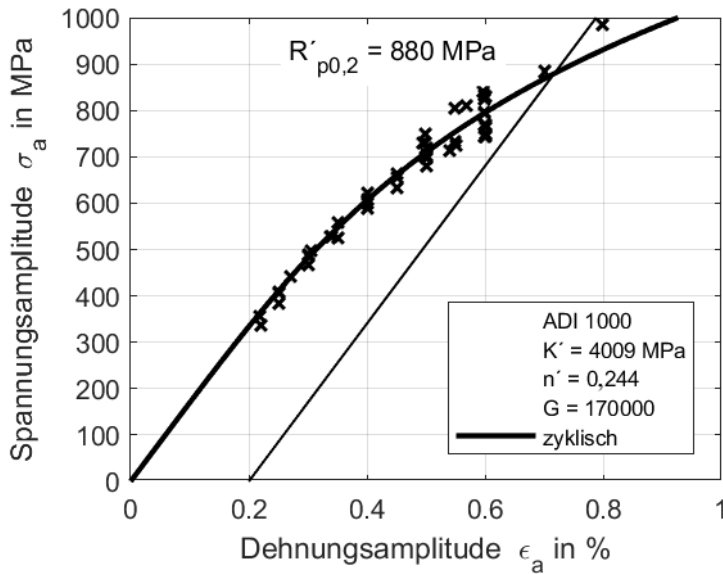


Abbildung 9.4: Daten aus [LEA 11]; zyklisches Spannungs-Dehnungsdiagramm für GJS 1000

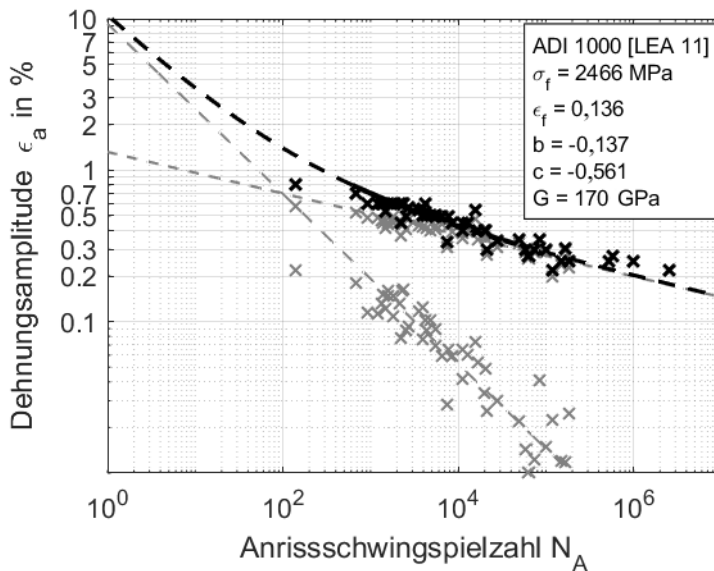


Abbildung 9.5: Daten aus [LEA 11]; Dehnungswöhlerlinie für GJS 1000

Für die Bestimmung der verformungsmechanischen Stützzahl auf Basis einer FE-Berechnung wird das zyklische Spannungs-Dehnungsdiagramm benötigt. Dies wird durch den zyklischen Verfestigungsexponenten (n') und den zyklischen Verfestigungskoeffizient K' sowie den E-Modul beschrieben. Die sich aus den Versuchen ergebenden Werte sind in Abbildung 9.6 dargestellt. Für Werkstoffe mit dazwischenliegenden Festigkeiten werden die Werte für die Berechnung durch Interpolation abgeschätzt.

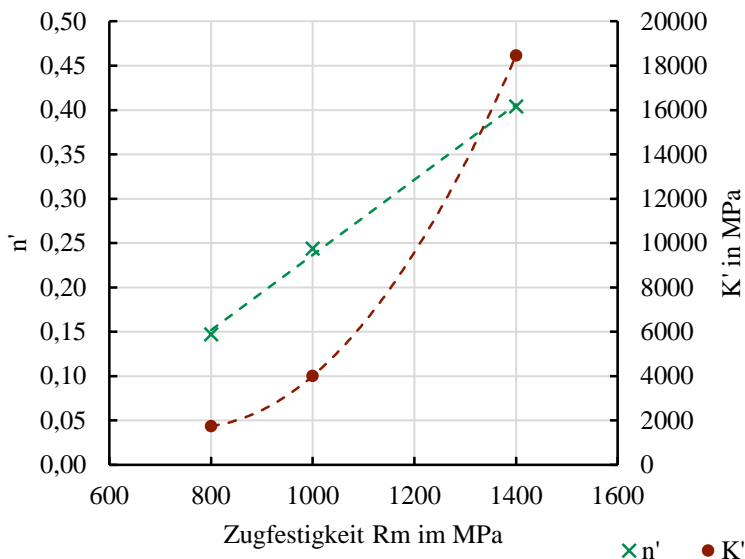


Abbildung 9.6: Abhängigkeit der zyklischen Kennwerte von der Werkstofffestigkeit

Für die Bestimmung der verformungsmechanischen Stützzahl nach [FKM 12] wird die dauerfest ertragbare wechselplastische Dehnung benötigt, die hier in Anlehnung an [FKM 12] aus der Dehnungswöhlerlinie bei 10^6 Lastwechseln bestimmt wird. Hier ergibt sich aus den Ergebnissen kein eindeutiger Zusammenhang zur Zugfestigkeit, sodass sie für die Berechnungen in Abschnitt 5.1.2 auf den kleinsten experimentell bestimmten Wert von $1,0 \cdot 10^{-5}$ gesetzt wird.

9.3 Datenbasis

Die folgenden Quellen bilden die Datenbasis für die durchgeführten Untersuchungen. Es sind jeweils die enthaltenen Daten sowie evtl. Einschränkungen genannt. Insgesamt sind es 99 Versuchsreihen und 1192 Einzelversuche.

Eigene Versuche:

Werkstoffe:	GJS 800-8, GJS 1400-1
Belastungsarten:	Flachbiegung, Umlaufbiegung, Torsion, Zugdruck
Lastwechselbereich:	Zeitfestigkeit, Langzeitfestigkeit
Belastungsverhältnisse:	$R = -1$, $R = 0$, $R = 0,5$
Umfang:	14 Versuchsreihen; 367 Einzelversuchsergebnisse
Ergebnisqualität:	Einzelversuchsergebnisse aus Treppenstufenversuchen
Zugfestigkeit:	umfangreiche Einzelversuchsergebnisse
Probengeometrie:	gegeben Flachbiegung, Umlaufbiegung, Torsion: Ø 14 mm Zugdruck: Ø 4 mm
Zyklische Kennwerte:	Dehnungsgeregelte Versuche
Bemerkung:	Im Projekt durchgeführte Versuche. Für die Parameteroptimierung genutzte Daten.

[Khal 05]

Werkstoffe:	GJS 800-8, GJS 1000-2, 2x GJS 1200-2
Belastungsarten:	Zugdruck, Flachbiegung, Torsion
Lastwechselbereich:	Langzeitfestigkeit
Belastungsverhältnisse:	$R = -1$, $R = 0$
Umfang:	14 Versuchsreihen; 220 Einzelversuchsergebnisse
Ergebnisqualität:	Einzelversuchsergebnisse aus Treppenstufenversuchen
Zugfestigkeit:	Einzelversuchsergebnisse
Probengeometrie:	gegeben Zugdruck: Ø 6 mm Flachbiegung: Ø 9 mm Torsion: Ø 7,5 mm
Zyklische Kennwerte:	nicht bekannt
Bemerkung:	Für die Parameteroptimierung genutzte Daten.

[Baue 05]

Werkstoffe:	GJS 900-6
Belastungsarten:	Flachbiegung
Lastwechselbereich:	Zeitfestigkeit, Langzeitfestigkeit

Belastungsverhältnisse:	R = -1
Umfang:	4 Versuchsreihen; 109 Einzelversuchsergebnisse
Ergebnisqualität:	Einzelversuchsergebnisse, Diagramm
Zugfestigkeit:	gegeben
Probengeometrie:	gegeben
Zyklische Kennwerte:	nicht bekannt, 22 x 15 mm
Bemerkung:	Untersuchung des Schwingfestigkeitseinflusses der Guss Oberfläche sowie unterschiedlicher Nachbehandlungsverfahren

[Chap 06]

Werkstoffe:	äquivalent zu GJS 1000-5
Belastungsarten:	Umlaufbiegung, gekerbt
Lastwechselbereich:	Zeitfestigkeit, Langzeitfestigkeit
Belastungsverhältnisse:	R = -1
Umfang:	4 Versuchsreihen; 30 Einzelversuchsergebnisse
Ergebnisqualität:	abgeschätzt aus geringer Versuchsanzahl
Zugfestigkeit:	gegeben
Probengeometrie:	gegeben, Ø 7,5 mm
	Kerbradien: 50 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm
Zyklische Kennwerte:	nicht bekannt
Bemerkung:	Untersuchung unterschiedlich stark gekerbter Umlaufbiegeproben

[Din 1564]

Werkstoffe:	GJS 800-10, GJS 900-8, GJS 1050-6, GJS 1200-3, GJS 1400-1
Belastungsarten:	Umlaufbiegung, ungekerbt, gekerbt
Lastwechselbereich:	Langzeitfestigkeit
Belastungsverhältnisse:	R = -1
Umfang:	10 Versuchsreihen; keine Einzelversuchsergebnisse
Ergebnisqualität:	Einzelwerte, Quelle nicht bekannt
Zugfestigkeit:	Einzelwerte, Quelle nicht bekannt
Probengeometrie:	Durchmesser und Kerbgeometrie gegeben, Ø 10,6 mm
	Kerbradius: 0,25 mm
Zyklische Kennwerte:	nicht bekannt
Bemerkung:	sehr scharf gekerbte Proben

[Gilb 86]

Werkstoffe:	Grade ADI 950/6, 1050/4, 1200/1
Belastungsarten:	Umlaufbiegung, ungekerbt, gekerbt

Lastwechselbereich:	Langzeitfestigkeit
Belastungsverhältnisse:	R = -1
Umfang:	8 Versuchsreihen; keine Einzel Versuchsergebnisse
Ergebnisqualität:	Einzelwerte
Zugfestigkeit:	Einzelwerte
Probengeometrie:	Durchmesser und Kerbgeometrie gegeben, Ø 9,6 mm Kerbradius: 0,25 mm
Zyklische Kennwerte:	nicht bekannt
Bemerkung:	Quelle auf die [Din 1564] verweist. Die untersuchten Werkstoffe sind jedoch abweichend.

[Hanz 06]

Werkstoffe:	Versuchswerkstoffe mit unterschiedlichen Auslagerungszeiten
Belastungsarten:	Zugdruck
Lastwechselbereich:	Langzeitfestigkeit
Belastungsverhältnisse:	R = -1
Umfang:	4 Versuchsreihen; keine Einzel Versuchsergebnisse
Ergebnisqualität:	Einzelwerte
Zugfestigkeit:	Einzelwerte
Probengeometrie:	Durchmesser und Länge gegeben, Ø 7 mm
Zyklische Kennwerte:	nicht bekannt
Bemerkung:	Im Projekt wurden unterschiedliche Auslagerungszeiten und ihre Einflüsse untersucht. Die Schwingfestigkeiten bleiben unter den Erwartungen.

[LEA 11]

Werkstoffe:	ADI 1200; ADI 1000
Belastungsarten:	Zugdruck, ungekerbt, gekerbt
Lastwechselbereich:	Zeitfestigkeit, Langzeitfestigkeit
Belastungsverhältnisse:	R = -1
Umfang:	9 Versuchsreihen; 110 Einzel Versuchsergebnisse
Ergebnisqualität:	Einzel Versuchsergebnisse, keine Treppenstufenversuche
Zugfestigkeit:	kleine Grafik, nicht von allen untersuchten Chargen
Probengeometrie:	gegeben, Ø 5 mm und teilweise Ø 4 mm Kerbradius: 3 mm
Zyklische Kennwerte:	gegeben, Chargenzuordnung nicht eindeutig
Bemerkung:	Umfangreiche Untersuchung unterschiedlicher Chargen und Proben aus Bauteilen. Teilweise ist die Zuordnung nicht ganz eindeutig.

[Lin 96]

Werkstoffe:	Versuchswerkstoffe mit unterschiedlichen Legierungen und Auslagerungszeiten
Belastungsarten:	Umlaufbiegung
Lastwechselbereich:	Zeitfestigkeit, Langzeitfestigkeit
Belastungsverhältnisse:	$R = -1$
Umfang:	8 Versuchsreihen; 84 Einzelversuchsergebnisse
Ergebnisqualität:	geringe Anzahl von Einzelversuchen, keine Treppenstufenversuche
Zugfestigkeit:	Einzelwerte
Probengeometrie:	gegeben, \varnothing 8 mm
Zyklische Kennwerte:	Diagramme in schlechter Qualität
Bemerkung:	Untersuchung unterschiedlicher Legierungen und Haltezeiten. Die Schwingfestigkeiten bleiben unter den Erwartungen.

[Lin 98]

Werkstoffe:	Versuchswerkstoffe mit zwei unterschiedlichen Festigkeiten
Belastungsarten:	Zugdruck, Umlaufbiegung, ungekerbt, gekerbt
Lastwechselbereich:	Zeitfestigkeit, Langzeitfestigkeit
Belastungsverhältnisse:	$R = -1$
Umfang:	8 Versuchsreihen; 55 Einzelversuchsergebnisse
Ergebnisqualität:	geringe Anzahl von Einzelversuchen, keine Treppenstufenversuche
Zugfestigkeit:	Einzelwerte
Probengeometrie:	gegeben, \varnothing 8 mm Kerbradien: 2 mm, 0,3 mm
Zyklische Kennwerte:	nicht bekannt
Bemerkung:	umfangreiche Untersuchung eines mittleren und eines hochfesten ADI-Werkstoffs

[Schö 15]

Werkstoffe:	MADI
Belastungsarten:	Zugdruck, Flachbiegung
Lastwechselbereich:	Kurzzeitfestigkeit, Zeitfestigkeit, Langzeitfestigkeit
Belastungsverhältnisse:	$R = -1$, $R = 0$, $R = 0,5$
Umfang:	5 Versuchsreihen; 72 Einzelversuchsergebnisse
Ergebnisqualität:	Einzelversuche, Diagramm
Zugfestigkeit:	Einzelwerte
Probengeometrie:	gegeben, \varnothing 5 mm, \varnothing 6 mm, \varnothing 7,5 mm

Zyklische Kennwerte: Kerbradien: 1,25 mm
gegeben
Bemerkung: Abgleich unter anderem mit [FKM 12] enthalten

[Sons 05]

Werkstoffe: GJS 800-8
Belastungsarten: Zugdruck
Lastwechselbereich: Zeitfestigkeit, Langzeitfestigkeit
Belastungsverhältnisse: $R = -1$
Umfang: 1 Versuchsreihe; 6 Einzelversuche
Ergebnisqualität: geringe Anzahl von Einzelversuchen, Diagramm
Zugfestigkeit: Einzelwerte
Probengeometrie: gegeben, \varnothing 8 mm
Kerbradien: 2 mm, 0,3 mm
Zyklische Kennwerte: nicht bekannt
Bemerkung: Bauteilversuche an einem Panhardstab

[Vask 09]

Werkstoffe: Versuchswerkstoffe unterschiedlicher Festigkeit
Belastungsarten: Zugdruck
Lastwechselbereich: Langzeitfestigkeit
Belastungsverhältnisse: $R = -1$
5 Versuchsreihen; keine Einzel Versuchsergebnisse
Ergebnisqualität: Einzelwerte
Zugfestigkeit: Einzelwerte
Probengeometrie: Über Prüfstand gegeben; \varnothing 4 mm
Zyklische Kennwerte: nicht bekannt
Bemerkung: Versuchsdurchführung an einem 20 kHz Prüfstand

[Vech 06]

Werkstoffe: Versuchswerkstoffe mit unterschiedlichen Legierungen und Auslagerungszeiten
Belastungsarten: Zugdruck
Lastwechselbereich: Langzeitfestigkeit
Belastungsverhältnisse: $R = -1$, $R = 0$
Umfang: 4 Versuchsreihen; keine Einzel Versuchsergebnisse
Ergebnisqualität: Einzelwerte
Zugfestigkeit: Einzelwerte
Probengeometrie: gegeben, \varnothing 7 mm
Zyklische Kennwerte: nicht bekannt

Bemerkung: Untersuchung unterschiedlicher Legierungen und Auslagerungszeiten. Die Schwingfestigkeiten bleiben unter den Erwartungen.

[Wohl 10]

Werkstoffe: ADI 1000
Belastungsarten: Zugdruck
Lastwechselbereich: Zeitfestigkeit, Langzeitfestigkeit
Belastungsverhältnisse: $R = -1$
Umfang: 2 Versuchsreihen; 26 Einzelversuchsergebnisse
Ergebnisqualität: Einzelversuchsergebnisse, Diagramm
Zugfestigkeit: Einzelwerte
Probengeometrie: Durchmesser gegeben $\varnothing 7,5$ mm
Zyklische Kennwerte: nicht bekannt
Bemerkung: Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Entnahmepositionen aus dem Gussrohling

[Wohl 11]

Werkstoffe: ADI 1000
Belastungsarten: Zugdruck
Lastwechselbereich: Zeitfestigkeit, Langzeitfestigkeit
Belastungsverhältnisse: $R = -1$
Umfang: 3 Versuchsreihen; 81 Einzelversuchsergebnisse
Ergebnisqualität: Einzelversuchsergebnisse, Diagramm
Zugfestigkeit: Einzelwerte
Probengeometrie: gegeben, $\varnothing 4,5$ mm und $\varnothing 7,5$ mm
Zyklische Kennwerte: nicht bekannt
Bemerkung: Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Wandstärken der Gussrohlinge

[Zapl 08]

Werkstoffe: entspricht ADI 900
Belastungsarten: Zugdruck
Lastwechselbereich: Zeitfestigkeit, Langzeitfestigkeit
Belastungsverhältnisse: $R = -1$
Umfang: 1 Versuchsreihe; 32 Einzelversuchsergebnisse
Ergebnisqualität: Einzelversuchsergebnisse, Diagramm
Zugfestigkeit: Einzelwerte
Probengeometrie: Durchmesser gegeben, $\varnothing 7$ mm und $\varnothing 8$ mm
Zyklische Kennwerte: nicht bekannt
Bemerkung: Untersuchung unterschiedlicher Funktionen zur Beschreibung der Wöhlerlinie

9.4 Übersicht Einzelversuchsergebnisse

Werkstoff: GJS 800-8 (ADI)

Belastungsart: Flachbiegung

Spannungsverhältnis: $R = -1$

Ergebnis:

Langzeitfestigkeit bei 10^7 LW: $S_{AD,10E7} = 417 \text{ MPa}$

Wöhlerlinienneigung: $k = 7,9$

Wöhlerlinienneigung im LLF: $k^* = 25$

Streuspanne HCF: $T_N = 2,9$

Streuspanne LLF: $T_L = 1,05$

Zeitfestigkeit:

	Probe															
	?1	?3	?2	?4	?2	?3	?1	?4	A1	A2	A3	A4	B2	B4		
S_A in MPa	543	543	543	563	584	503	624	666	666	503	666	481	461	441		
Schwing-spielzahl	219.614	70.803	82.974	123.994	152.760	305.511	52.243	20.003	26.934	377.414	37.457	327.287	498.793	6266986*		

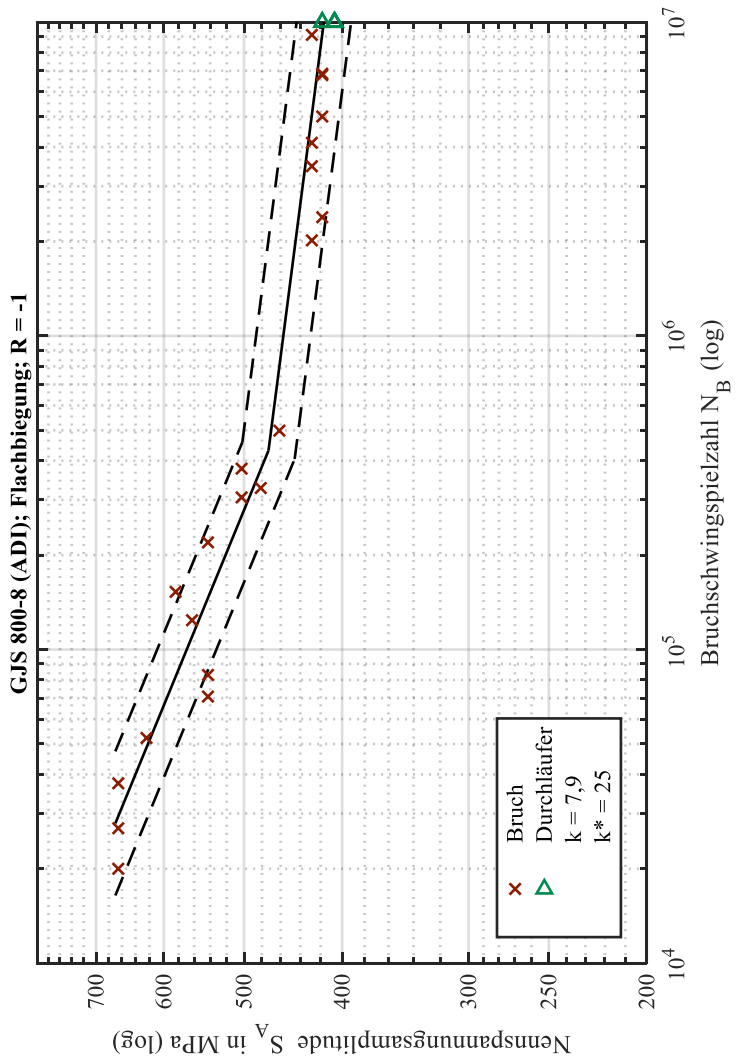
* Im Übergangsbereich zu Langzeitfestigkeit

Langzeitfestigkeit:

		Probe															
		C1	C4	C2	G4	D1	G2	G1	G3	D3	D2	F4	E4	F1	E1	C3	
S_A in MPa	439,9																
	428,5		x		x		x		x								
	418,5										o	x	x	o	x	x	
	407,0	o		o		o		o		o							
	397,0																
Schwing-spielzahl		10.000.000	3.474.158	10.000.000	2.015.839	10.000.000	9.113.064	10.000.000	4.126.607	10.000.000	10.000.000	6.782.183	6.854.832	10.000.000	5.004.610	2.389.560	

"x": Bruch; "o": Durchläufer

Die Probennummer gibt jeweils Auskunft über die Entnahmeposition nach Abbildung 4.10. Der Buchstabe kennzeichnet Proben aus demselben Gussrohling. Bei den mit Fragezeichen gekennzeichneten Proben war eine eindeutige Zuordnung zu den jeweiligen Gussrohlingen nicht mehr möglich.



Werkstoff: GJS 800-8 (ADI)

Belastungsart: Flachbiegung

Spannungsverhältnis: R = 0

Ergebnis:

Langzeitfestigkeit bei 10^7 LW: $S_{AD,10E7} = 300$ MPa

Wöhlerlinienneigung: k = 7,3

Wöhlerlinienneigung im LLF: $k^* = 25$

Streuspanne HCF: $T_N = 4,5$

Streuspanne LLF: $T_L = 1,19$

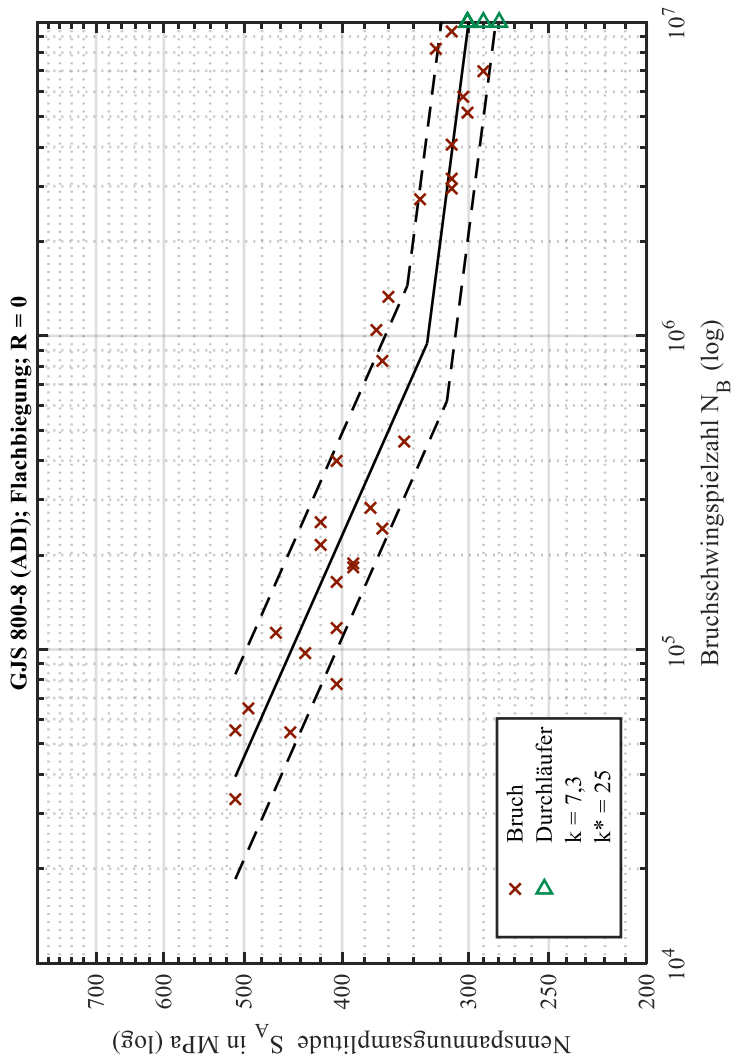
Zeitfestigkeit:

	Probe															
	B1	B3	E2	F3	F1	F3	F4	F2	B1	B3	B2	B4	A3	A4	A1	E1
S_A in MPa	370	390	405	405	405	405	390	375	365	365	420	420	435	450	465	495
Schwing- spielzahl	1.043.755	182.818	399.463	117.074	77.606	164.234	188.157	282.919	831.930	242.977	254.664	215.588	97.395	54.448	113.051	64.916
																55.252
																33.336
																1.331.931
																460.275

Langzeitfestigkeit:

		Probe															
		E2	C3	C2	C1	G1	G2	D3	G3	H1	C4	D4	G4	D1	H2	H3	H4
S_A in MPa	386,9																
	373,2																
	360,0 (x)																
	347,3 (x)																
	335,0			(x)													
	323,2				(x)												
	311,7					x					x		x		x		
	300,7						x				o		o		o		x
	290,1							x		o							z
	279,9								o								
Schwing- spielzahl	270,0																
	1.331.931																
	460.275																
	2.725.480																
	8.225.107																
	9.344.775																
	5.782.818																
	6.978.013																
	10.000.000																
	10.000.000																
	10.000.000																
	4.070.869																
	10.000.000																
	2.949.579																
	10.000.000																
	3.170.425																
	5.148.561																

"x": Bruch; "o": Durchläufer



Werkstoff: GJS 1400-1 (ADI)

Belastungsart: Flachbiegung

Spannungsverhältnis: $R = -1$

Ergebnis:

Langzeitfestigkeit bei 10^7 LW: $S_{AD,10E7} = 389 \text{ MPa}$

Wöhlerlinienneigung: $k = 7,6$

Wöhlerlinienneigung im LLF: $k^* = 25$

Streuspanne HCF: $T_N = 7,7$

Streuspanne LLF: $T_L = 1,05$

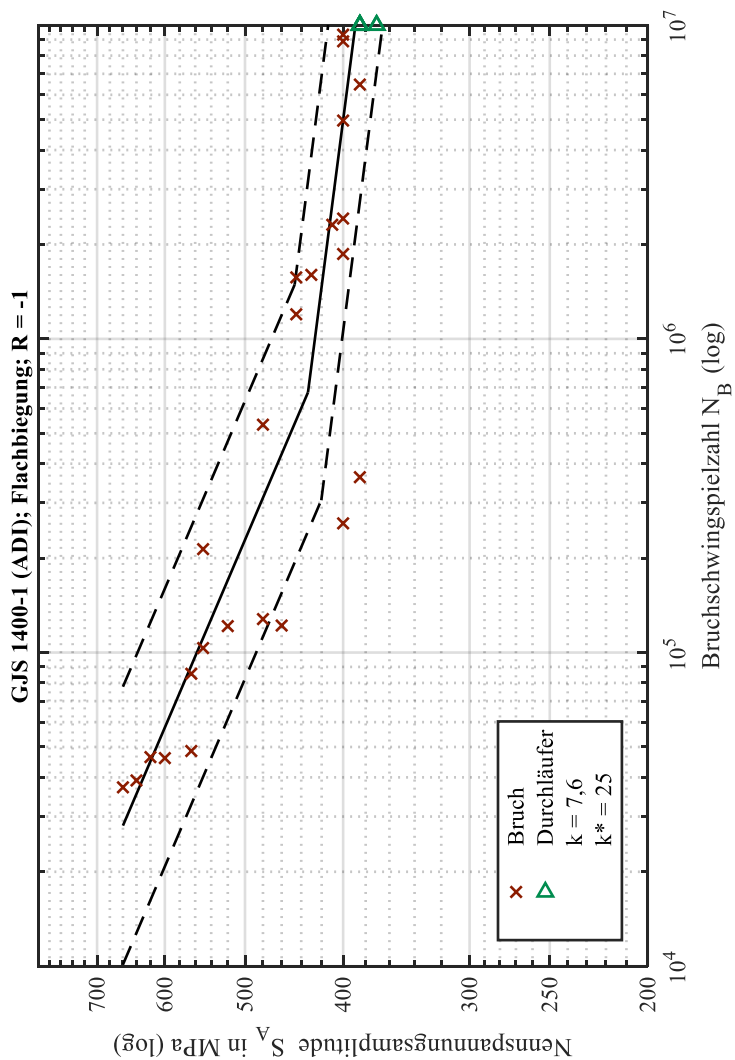
Zeitfestigkeit:

	Probe																
	A1	B4	B2	A4	B1	C3	D2	C2	D4	C1	C4	D1	D3	A3	A2	B3	H4
S_A in MPa	550	550	520	480	480	565	565	600	460	445	620	640	660	445	430	410	400
Schwing- spielzahl	213.609	103.353	121.827	127.827	532.725	48.534	85.586	46.070	121.937	1.570.676	46.411	39.108	37.178	1.197.652	1.599.874	2.311.401	258.144

Langzeitfestigkeit:

		Probe															
		F2	F3	F1	G1	F4	H2	H4	H1	H3	G4	G2	G3	I1	I2	I3	
S_A in MPa	415,5																
	400,0	x				x		x		x		x				x	
	385,1		x		o		o		o		o		x		o		z
	370,7			o										o			
	356,8																
Schwing-spielzahl		9.331.139	362.281	10.000.000	10.000.000	4.965.821	10.000.000	258.144	10.000.000	2.419.198	10.000.000	8.882.876	6.469.837	10.000.000	10.000.000	1.865.025	

"x": Bruch; "o": Durchläufer



Werkstoff: GJS 1400-1 (ADI)

Belastungsart: Flachbiegung

Spannungsverhältnis: $R = 0$

Ergebnis:

Langzeitfestigkeit bei 10^7 LW: $S_{AD,10E7} = 247 \text{ MPa}$

Wöhlerlinienneigung: $k = 7,3$

Wöhlerlinienneigung im LLF: $k^* = 25$

Streuspanne HCF: $T_N = 6,3$

Streuspanne LLF: $T_L = 1,06$

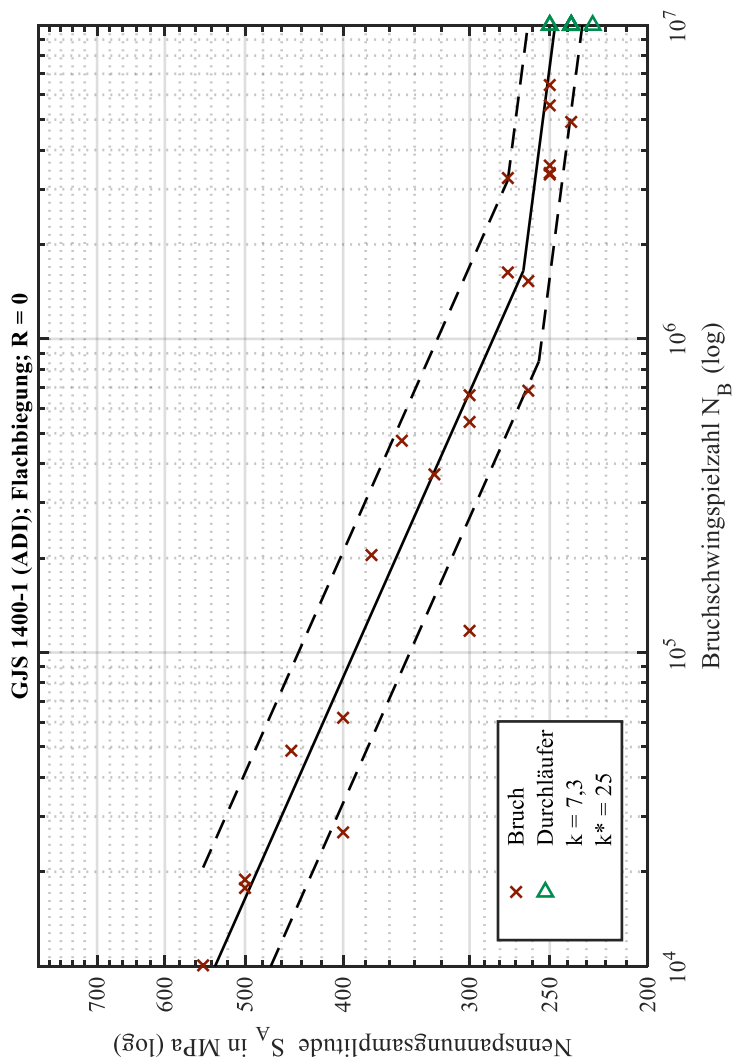
Zeitfestigkeit:

	Probe															
	I4	E1	E3	E2	E4	D4	D3	D2	D1	B4	B3	B2	B1	A3	A4	
S_A in MPa	550	500	400	300	250	300	300	350	375	325	450	400	275	500	275	
Schwing- spielzahl	10.062	18.887	26.711	117.283	3.570.924	543.497	661.340	473.491	204.528	369.888	48.636	61.938	3.256.766	17.755	1.629.038	

Langzeitfestigkeit:

		Probe															
		A1	A2	G4	E3	F2	E2	H4	F1	E1	I4	H1	F3	F4	I1	E4	
S_A in MPa	275,6																
	262,5			x												x	
	250,0	o			x		x				x		x		o		z
	238,1	o				o		x		o		o		o			
	226,8								o								
	216,0																
Schwing-spielzahl		10.000.000	10.000.000	1.527.702	5.551.637	10.000.000	6.445.308	4.916.814	10.000.000	10.000.000	3.379.024	10.000.000	3.342.790	10.000.000	10.000.000	683.584	

"x": Bruch; "o": Durchläufer



Werkstoff: GJS 800-8 (ADI)

Belastungsart: Torsion

Spannungsverhältnis: $R = -1$

Ergebnis:

Langzeitfestigkeit bei 10^7 LW: $S_{AD,10E7} = 355 \text{ MPa}$

Wöhlerlinienneigung: $k = 17,2$

Wöhlerlinienneigung im LLF: $k^* = 25$

Streuspanne HCF: $T_N = 3,9$

Streuspanne LLF: $T_L = 1,18$

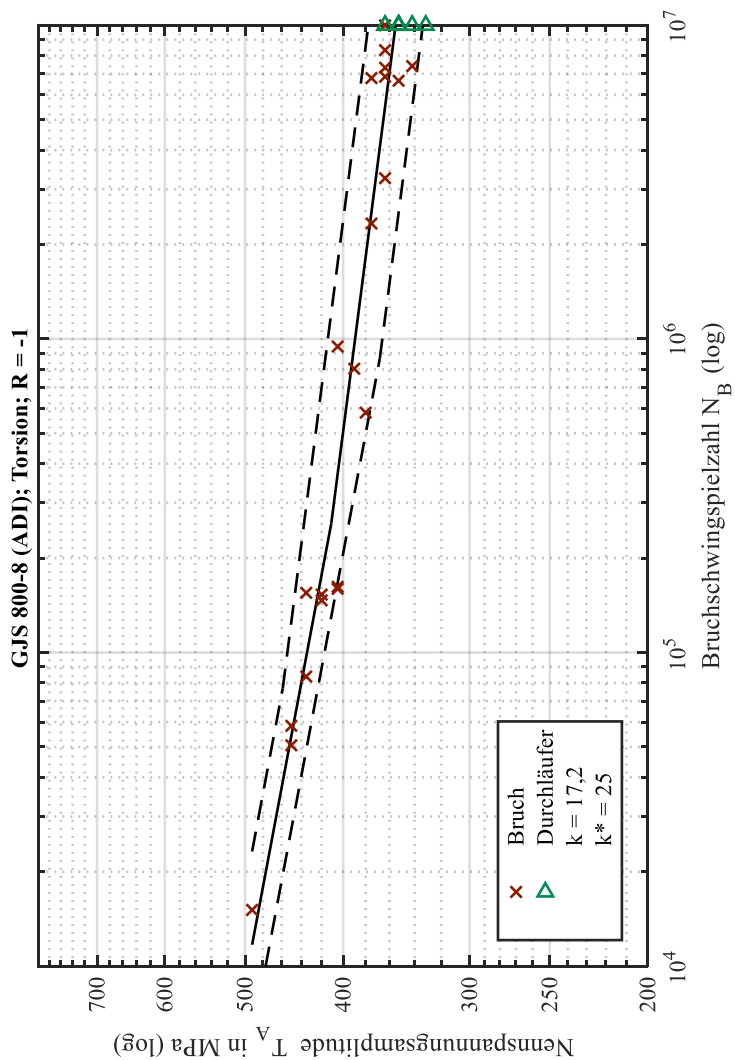
Zeitfestigkeit:

	Probe													
	E3	E4	G1	G2	G3	G4	C1	C2	C3	C4	F1	F2	F3	F4
T_A in MPa	435	435	405	450	420	420	450	492	492	405	405	390	380	375
Schwing-spielzahl	155.008	83.860	945.467	58.395	146.652	153.054	50.609	15.113	9.665	159.629	162.051	803.353	581.891	2.332.603

Langzeitfestigkeit:

		Probe															
		B1	B2	B3	B4	D1	D2	D4	I1	I2	I3	I4	H1	H3	J2	J1	
S_A in MPa	386,8																
	375,0						x										
	363,6	x		x		o		x		x		x					
	352,6		o		o				o		o		x				z
	341,9													x		o	
	331,5														o		
	321,4																
Schwing-spielzahl		7.321.161	10.000.000	8.327.963	10.000.000	10.000.000	6.782.183	6.854.832	10.000.000	9.992.734	10.000.000	3.253.355	6.653.032	7.408.210	10.000.000	10.000.000	

"x": Bruch; "o": Durchläufer



Werkstoff: GJS 800-8 (ADI)

Belastungsart: Torsion

Spannungsverhältnis: $R = 0$

Ergebnis:

Langzeitfestigkeit bei 10^7 LW: $S_{AD,10E7} = 249 \text{ MPa}$

Wöhlerlinienneigung: $k = 12,5$

Wöhlerlinienneigung im LLF: $k^* = 25$

Streuspanne HCF: $T_N = 4,0$

Streuspanne LLF: $T_L = 1,25$

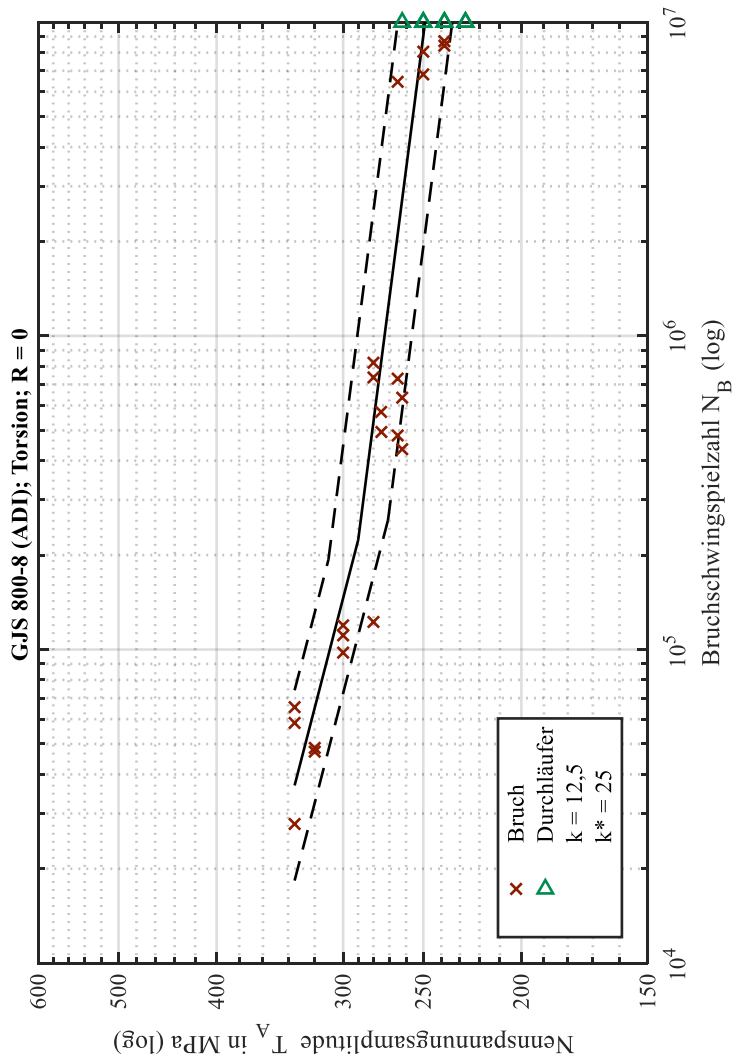
Zeitfestigkeit:

	Probe														
	A3	B1	B2	B3	B4	I2	I3	I4	E3	E2	E4	E1	G3	G2	
T _A in MPa	280	300	300	280	265	280	300	320	320	335	265	335	335	275	275
Schwing- spielzahl	821.237	97.755	119.429	122.471	481.375	737.064	110.942	47.257	48.571	58.345	730.694	65.511	27.788	493.887	572.131

Langzeitfestigkeit:

		Probe															
		G1	G4	D2	D1	F4	H4	H2	H1	D3	H3	F2	C1	C3	C2	C4	
S_A in MPa	288,7																
	275,2					x											
	262,3		x		o		x										z
	250,0	o		o				x						x		o	
	238,3								x		x		o		o		
	227,1									o		o					
	216,5																
Schwing- spielzahl		10.000.000	635.270	10.000.000	10.000.000	572.131	435.232	6.817.383	8.699.119	10.000.000	8.420.527	10.000.000	10.000.000	8.054.679	10.000.000	10.000.000	

"x": Bruch; "o": Durchläufer



Werkstoff: GJS 1400-1 (ADI)

Belastungsart: Torsion

Spannungsverhältnis: $R = -1$

Ergebnis:

Langzeitfestigkeit bei 10^7 LW: $S_{AD,10E7} = 334 \text{ MPa}$

Wöhlerlinienneigung: $k = 5,3$

Wöhlerlinienneigung im LLF: $k^* = 25$

Streuspanne HCF: $T_N = 4,7$

Streuspanne LLF: $T_L = 1,21$

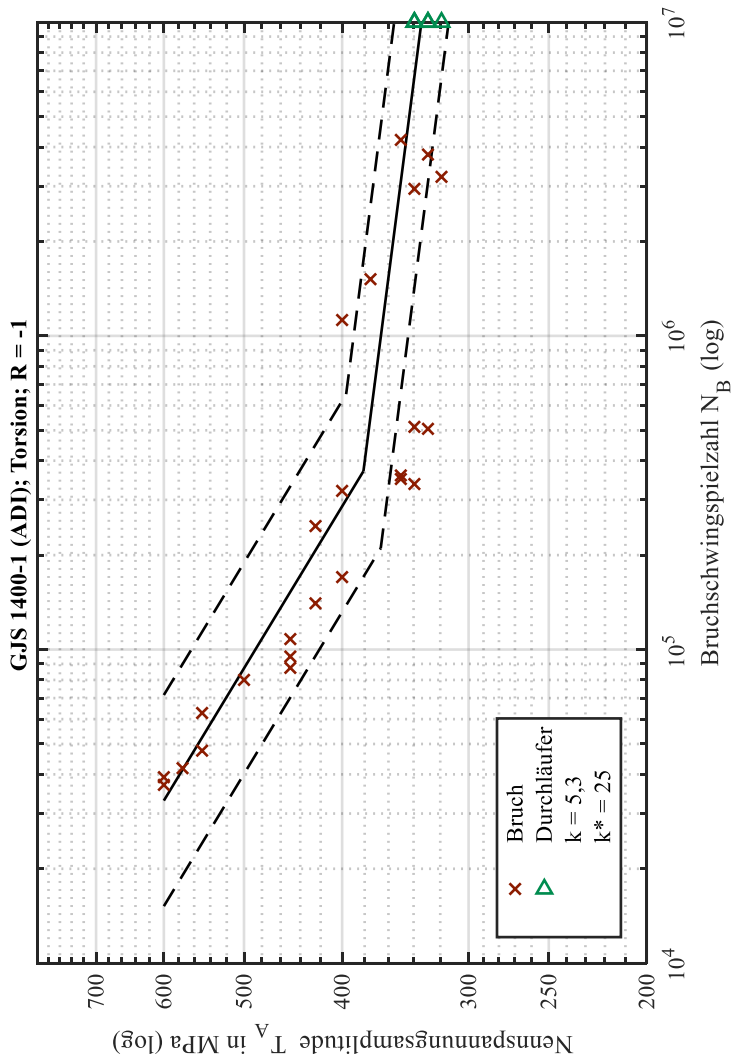
Zeitfestigkeit:

	Probe																	
	A1	A4	G2	A2	A3	C3	C4	G1	G3	G2	G4	E1	E3	E2	E4	I3	A3	
T _A in MPa	400	450	400	425	400	450	500	550	550	425	575	600	600	375	450	350	350	
Schwing- spielzahl	320.503	95.010	1.123.536	140.360	170.211	107.978	80.012	62.765	47.599	247.507	41.855	37.029	39.182	1.516.176	87.421	358.980	349.732	

Langzeitfestigkeit:

		Probe															
		I1	F1	I3	I2	H1	A2	A3	A4	A1	B4	F2	H2	B3	C4		
S_A in MPa	361,0																
	350,0	x		x				x									
	339,4		o		x		o		x		x						
	329,1					o				o		x		x			
	319,1												o		x		
	309,4															z	
	300,0																
Schwing-spielzahl		4.215.013	10.000.000	358.980	512.835	10.000.000	10.000.000	349.732	337.016	10.000.000	2.942.692	3.785.040	10.000.000	505.432	3.214.286		

"x": Bruch; "o": Durchläufer



Werkstoff: GJS 1400-1 (ADI)

Belastungsart: Torsion

Spannungsverhältnis: $R = 0$

Ergebnis:

Langzeitfestigkeit bei 10^7 LW: $S_{AD,10E7} = 204 \text{ MPa}$

Wöhlerlinienneigung: $k = 5,1$

Wöhlerlinienneigung im LLF: $k^* = 25$

Streuspanne HCF: $T_N = 3,2$

Streuspanne LLF: $T_L = 1,22$

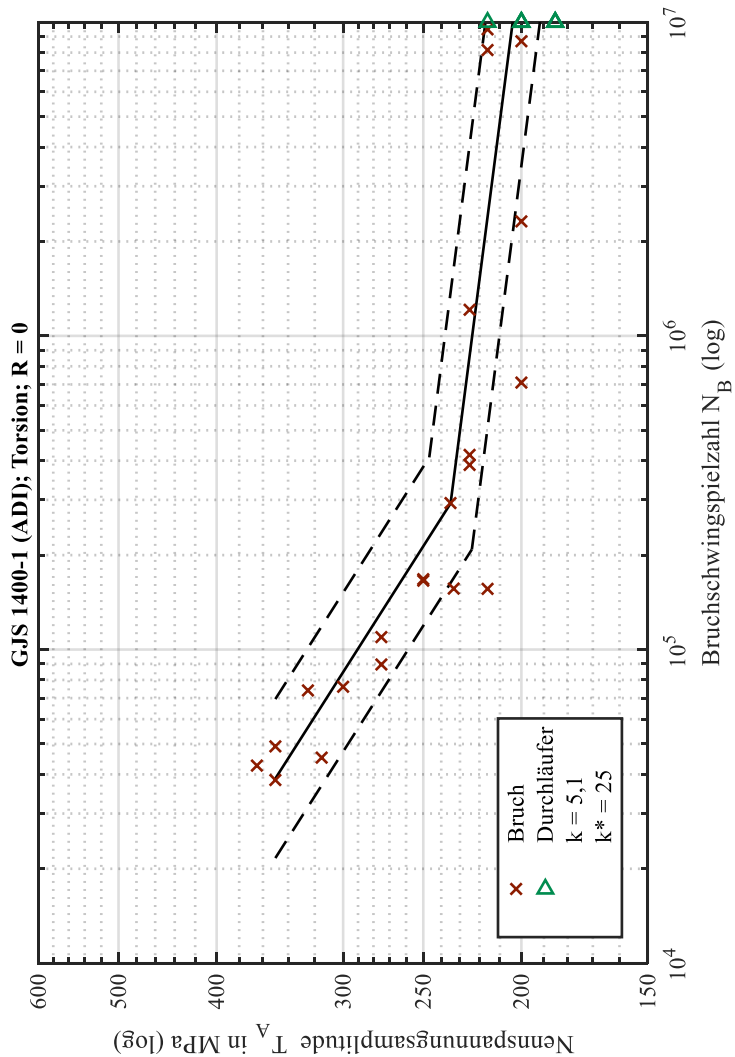
Zeitfestigkeit:

	Probe													
	E4	E3	E2	E1	D2	D1	D3	D4	F2	F1	F4	F3	I2	I3
T_A in MPa	300	275	275	250	225	250	325	350	350	225	225	365	235	315
Schwing- spielzahl	76.101	89.615	109.565	165.747	1.211.506	167.601	74.071	38.378	49.125	387.780	417.439	42.664	293.102	45.228

Langzeitfestigkeit:

		Probe														
		I4	I1	C2	C1	B2	B1	B4	B3	H4	H3	H2	H1	G3	G4	G1
S_A in MPa	252,0															
	233,3													x		
	216,0				x		x						o		x	z
	200,0	x		o		o		x		x		o				o
	185,2		o						o		o					
	171,5															
Schwing-spielzahl		2.317.453	10.000.000	10.000.000	9.487.658	20.000.000	8.153.584	8.695.824	10.000.000	709.786	10.000.000	10.000.000	10.000.000	156.436	156.125	10.000.000

"x": Bruch; "o": Durchläufer



Werkstoff: GJS 800-8 (ADI)

Belastungsart: Flachbiegung

Spannungsverhältnis: $R = 0,5$

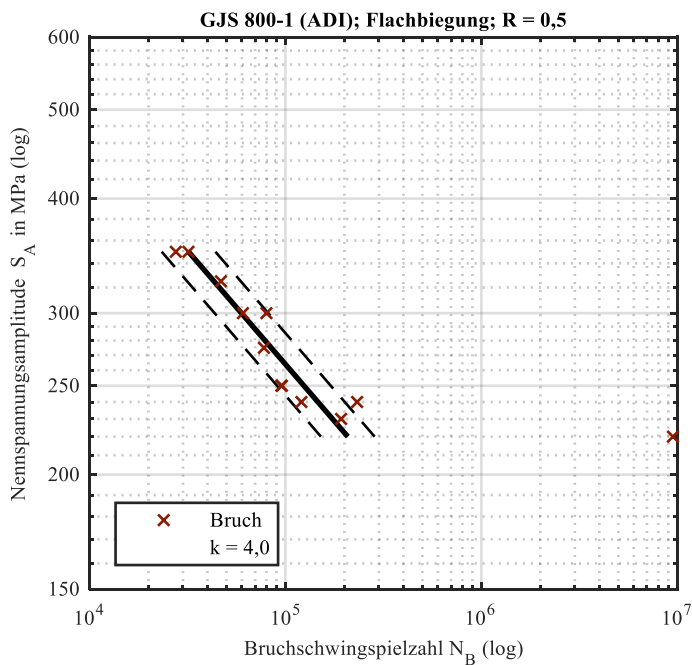
Ergebnis:

Wöhlerlinienneigung: $k = 4,0$

Streuspanne HCF: $T_N = 1,9$

Zeitfestigkeit:

	Probe											
	E4	E2	E3	E1	F2	B3	C2	C1	C4	D2	F4	F1
S_A in MPa	350	300	250	230	220	250	300	240	350	325	240	275
Schwing-spielzahl	31.986	60.691	95.335	192.381	9.499.600	96.005	80.004	232.217	27.582	46.854	120.653	77.689

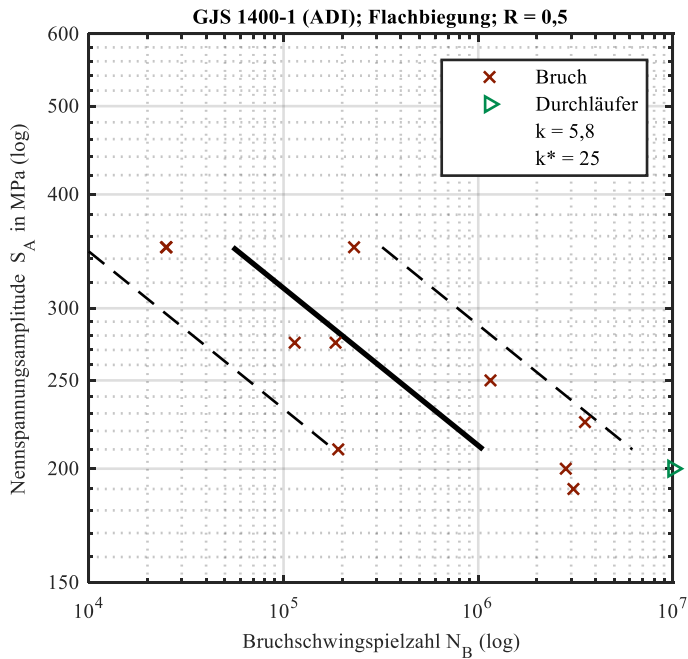


Werkstoff: GJS 1400-1 (ADI)
Belastungsart: Flachbiegung
Spannungsverhältnis: R = 0,5
Ergebnis: Wöhlerlinienneigung: k = 5,8
Streuspanne HCF: T_N = 34,2

Zeitfestigkeit:

	Probe										
	I3	G1	G2	H3	H2	I2	C1	C2	G3	C3	C4
S _A in MPa	250	275	350	350	275	350	225	200	210	200	190
Schwing-spielzahl	1.155.784	185.001	230.233	24.890	114.077	25.045	3.533.207	10000000*	190.964	2.816.051	3.081.226

* Durchläufer



Werkstoff: GJS 1400-1 (ADI)

Belastungsart: Torsion

Spannungsverhältnis: $R = 0,5$

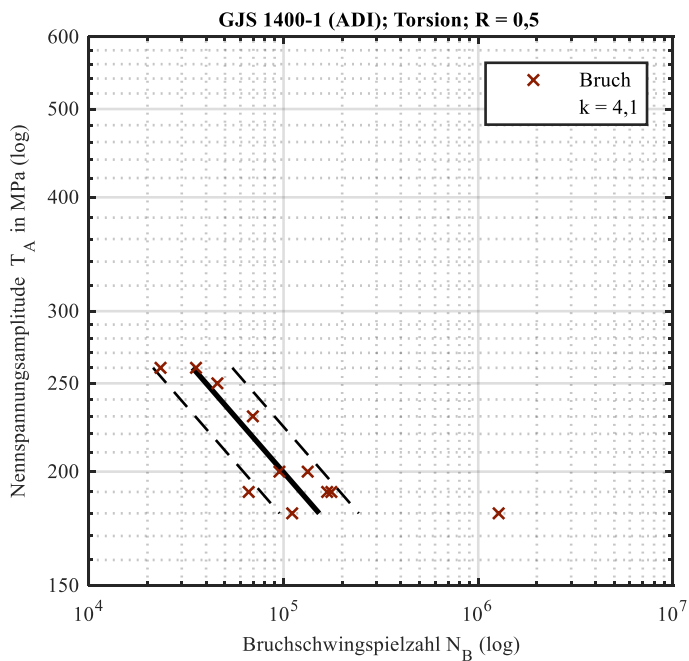
Ergebnis:

Wöhlerlinienneigung: $k = 4,1$

Streuspanne HCF: $T_N = 2,6$

Zeitfestigkeit:

	Probe										
	F4	D4	D3	D2	D1	C2	H4	C1	B1	I4	B2
T_A in MPa	200	230	180	250	180	200	260	260	190	190	190
Schwing-spielzahl	133.033	69.552	110.727	45.704	1.272.827	95.205	23.340	35.498	176.043	66.198	167.458



Werkstoff: GJS 800-8 (ADI)

Belastungsart: Torsion

Spannungsverhältnis: $R = 0,5$

Ergebnis:

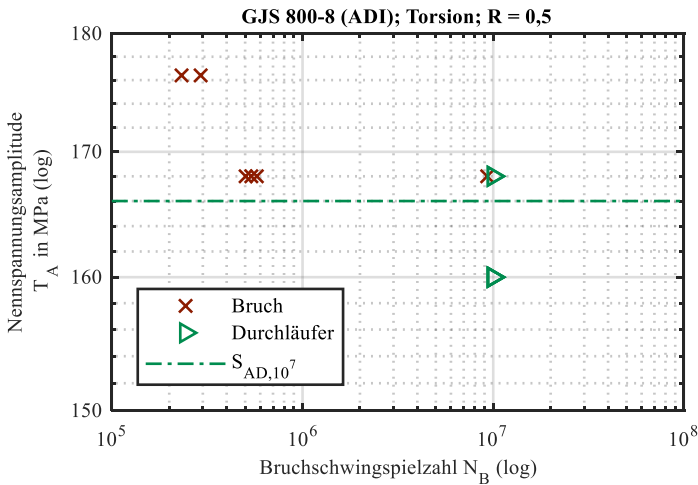
Langzeitfestigkeit bei 10^7 LW: $S_{AD,10E7} = 166 \text{ MPa}$

Streuspanne LLF: $T_L = 1,06$

Langzeitfestigkeit:

		Probe											
		H4	A2	A3	A4	B2	B1	B3	C3				
S _A in MPa	185,2												
	176,4							x			x		
	168,0		x		x		o		x		o		x
	160,0	o		o		o				o			z
	152,4												
Schwing-spielzahl		10.000.000	538.808	10.000.000	503.032	10.000.000	10.000.000	232.115	474.708	10.000.000	10.000.000	292.297	9.297.342

"x": Bruch; "o": Durchläufer

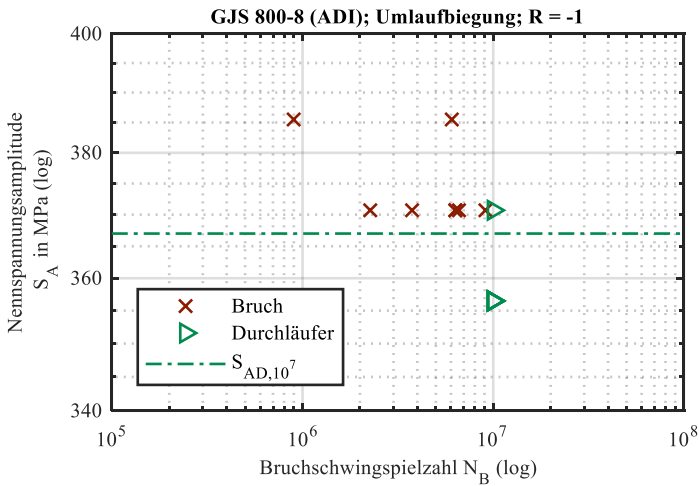


Werkstoff: GJS 800-8 (ADI)
Belastungsart: Umlaufbiegung
Spannungsverhältnis: R = -1
Ergebnis:
Langzeitfestigkeit bei 10⁷ LW: S_{AD,10E7} = 367 MPa
Streuspanne LLF: T_L = 1,05

Langzeitfestigkeit:

		Probe													
		A1	C2	A4	A2	C1	B3	C4	C3	B1	B4	D4	D1	D3	A3
S _A in MPa	401,0														
	385,5	x		x											
	370,7		o		x		x		x		x		x		x
	356,5					o		o		o		o		o	
	342,7														z
Schwing-spielzahl		6.092.600	10.000.000	898.400	6.329.500	10.000.000	6.328.200	10.000.000	9.098.000	10.000.000	3.752.800	10.000.000	2.263.900	10.000.000	6.611.700

"x": Bruch; "o": Durchläufer



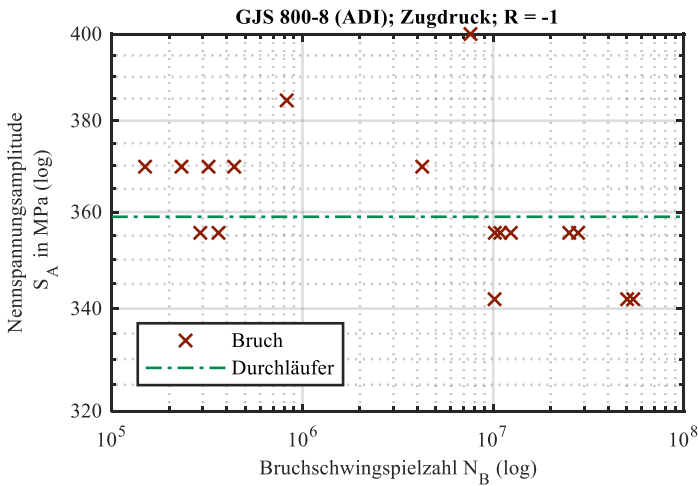
Werkstoff: GJS 800-8 (ADI)
Belastungsart: Zugdruck
Spannungsverhältnis: R = -1
Ergebnis:

Langzeitfestigkeit bei 10⁷ LW: S_{AD,10E7} = 359 MPa
Streispanne LLF: T_L = 1,05

Langzeitfestigkeit:

		Probe																	
		X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7		Y9
S _A in MPa	416,0																		
	400,0	(x)																	
	384,6		(x)																
	369,8			x		x		x				x				x		z	
	355,6				o		o		x		o		x		o		o		
	341,9									o				o					(x)
	328,8																		
Schwing- spielzahl		7.595.920	825.820	4.243.444	27.858.875	231.931	12.372.920	149.390	291.017	54.197.857	10.190.032	321.435	362.570	10.161.203	10.887.854	438.177	25.030.973		50.367.402

"x": Bruch; "o": als Durchläufer bewertet (mehr als 10⁷ LW)



Werkstoff: GJS 1400-1 (ADI)

Belastungsart: Zugdruck

Spannungsverhältnis: R = -1

Ergebnis:

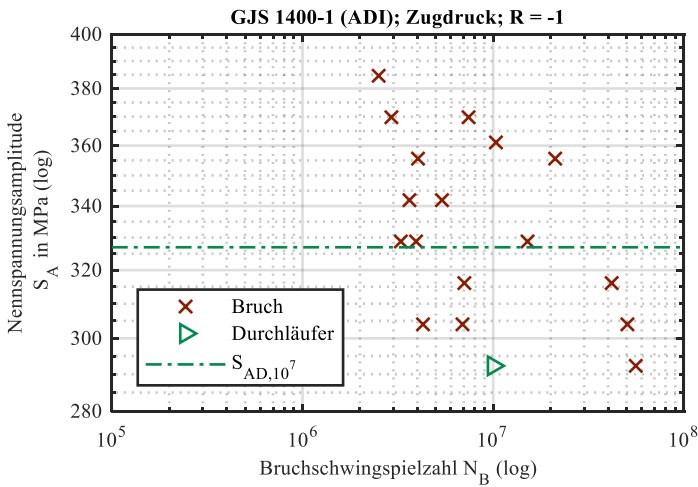
Langzeitfestigkeit bei 10^7 LW: $S_{AD,10E7} = 327 \text{ MPa}$

Streuspanne LLF: $T_L = 30,4$

Langzeitfestigkeit:

		Probe																	
		X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9
S _A in MPa	400,0																		
	384,6	(x)																	
	369,8		x																
	355,6			o															
	341,9					x													
	328,8						x												
	316,1							x							o				
	304,0								x		x			o					
	292,3									x		o		o					
	281,0																		
	Schwing-spielzahl	2.507.250	7.425.354	21.121.722	2.923.653	4.030.144	3.635.430	3.937.924	7.054.374	4.282.063	10.000.000	6.898.894	55.887.723	50.524.371	41.783.309	15.130.339	5.385.055	3.276.894	10.330.507

"x": Bruch; "o": als Durchläufer bewertet (mehr als 10^7 LW)



9.5 Werkstoffprüfzeugnisse



Abnahmeprüfzeugnis
Inspection Certificate

nach EN 10 204 ☒ 3.1 ☐ 3.2
acc-to

Werkzeugnis / Werksbescheinigung
Test report / Certificate of
compliance with the order

nach EN 10 204 ☐ 2.2 ☐ 2.1
acc-to

HULVERSHORN

Eisengießerei GmbH & Co. KG
46395 Bocholt · Franzstr. 58-60
46365 Bocholt · Postfach 1551
Telefon 0 28 71 / 99 01-200
Telefax 0 28 71 / 99 01-35
e-mail: info@hubo.de
http://www.hubo.de

Besteller / Purchaser

Institut für maschinelle Anlagentechnik u. Betriebsfestigkeit, Leibnizstr.32, 38678 Clausthal-Zellerfeld, Deutschland

Ihre Bestell-Nr. / your Order No. vom / from unsere Auftrags-Nr. / our Order No. Ihre Artikelnr. / your Item-No.
15/08 09.04.15 2872/ 583318 Y-4 200mm

Lieferschein-Nr. / Delivery note No. Werkstoff / Material
15001712 EN-GJS-800-8

Abstich Nr. / Heat No. Gießdatum (Lfd. Nr.) / Melting date (Item No.)
53,54,55,56,57,58 28.05.15(1,2,3),11.05.15(4,5,6)

Anforderungen / Requirements Probenform / Test coupon
DIN EN 1564 Y4 Probe

Mechanische Eigenschaften / Mechanical Properties

Lfd. Nr. Item No.	Stückzahl Quantity	Gegenstand/Objekt Model-No/Model-No	Probenab- Test Specimen Ø mm	Chargen-Nr. Charge No.	Streckgrenze Yield stress Rp 0.2 N/mm² 500	Zugfestigkeit Tensile strength Rm N/mm² 720	Dehnung Elongation %	Kerbschlagarbeit Impact energy ISO-VJ J / at -20°C	Härte Hardness value HB 230-310
1	13	Y4-Probe	14,00	1/ 9111					285
2	14	-----	-----	2/ 9111					295
3	14	-----	-----	3/ 9111					
4	14	-----	-----	4/ 9128					
5	14	-----	-----	5/ 9128					
6	15	-----	-----	6/ 9128					

Chemische Zusammensetzung / Chemical Composition [%]

Lfd. Nr. Item No.	Chargen-Nr. Charge No.	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Cu	Ni	Mo	Sn
1	1/ 9111	3,58	2,10	0,24	0,030	0,007	0,050	0,04	0,77	1,33	0,13	0,004
2	2/ 9111	3,58	2,03	0,24	0,030	0,009	0,055	0,04	0,80	1,44	0,14	0,004
3	3/ 9111	3,58	2,16	0,24	0,029	0,008	0,046	0,04	0,81	1,46	0,14	0,004
4	4/ 9128	3,58	2,06	0,27	0,021	0,007	0,055	0,05	0,79	1,47	0,14	0,004
5	5/ 9128	3,58	2,10	0,27	0,022	0,007	0,052	0,05	0,79	1,47	0,14	0,004
6	6/ 9128	3,58	2,20	0,27	0,022	0,006	0,052	0,05	0,80	1,48	0,14	0,004

Prüfbestand / Results Die gestellten Anforderungen sind erfüllt. / The requirements are fulfilled.

Bemerkungen /
Remarks

Anlage / Attachment

Der Werksachverständige / The Workinspector

Datum / Date 01.07.2015

Unterschrift / Signature

HULVERSHORN

Eisengießerei GmbH & Co. KG
46395 Bocholt · Franzstraße 60
Telefon 0 28 71 / 99 01-0





Abnahmeprüfzeugnis
Inspection Certificate

nach EN 10 204 ☒ 3.1 ☐ 3.2
acc-to

Werkszeugnis/Werksbescheinigung
Test report / Certificate of
compliance with the order

nach EN 10 204 ☐ 2.2 ☐ 2.1
acc-to

HULVERSHORN
Eisengießerei GmbH & Co. KG
46395 Bocholt · Franzstr. 58-60
46365 Bocholt · Postfach 1551
Telefon 0 28 71 / 99 01-200
Telefax 0 28 71 / 99 01-35
e-mail: info@hubo.de
http://www.hubo.de

Besteller / Purchaser
Institut für maschinelle Anlagentechnik u. Betriebsfestigkeit, Leibnizstr.32, 38678 Clausthal-Zellerfeld, Deutschland

Ihre Bestell-Nr. / your Order No. 15/08-1 Pos. 1	vom / from 4796	unsere Auftrags-Nr. / our Order No.	Ihre Artikelnr. / your Item-No. Y4-200mm
Lieferschein-Nr. / Delivery note No. 16000952	Werkstoff / Material EN-GJS-1400-1		
Abstich Nr. / Heat No. 56, 57	Gießdatum (Lfd. Nr.) / Melting date (Item No.) 24.02.16(1,2)		
Anforderungen / Requirements DIN EN 1564	Probenform / Test coupon Y4 Probe		

Mechanische Eigenschaften / Mechanical Properties

Lfd. Nr. Item No.	Stückzahl Quantity	Gegenstand/Objekt Model-No/Model-No	Probestab Test Specimen Ø mm	Chargen-Nr. Charge No.	Streckgrenze Yield stress Rp 0.2 N/mm² 1100	Zugfestigkeit Tensile strength Rm N/mm² 1400	Dehnung Elongation %	Kerbschlagarbeit Impact energy ISO-V J bei / at -20°C	Härte Hardness value HB 350-400
1	43	Y4-Probe	14,00	1/ 9400					417
2	29	-----	-----	2/ 9400					438

Chemische Zusammensetzung / Chemical Composition [%]

Lfd. Nr. Item No.	Chargen-Nr. Charge No.	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Cu	Ni	Mo	Sn
1	1/ 9400	3,58	2,07	0,22	0,031	0,008	0,055	0,06	0,77	2,02	0,14	0,003
2	2/ 9400	3,58	2,08	0,22	0,029	0,008	0,054	0,06	0,76	2,02	0,14	0,003

Prüfbestand / Results Die gestellten Anforderungen sind erfüllt / The requirements are fulfilled.

Bemerkungen /
Remarks

Anlage / Attachment

Der Werksachverständige / The Worksinspector

Datum / Date 14.04.2016

Unterschrift / Signature

HULVERSHORN

Eisengießerei GmbH & Co. KG
46395 Bocholt · Franzstraße 60
Telefon 0 28 71 / 99 01-0

